

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET

GEOLOŠKI ODSJEK

SANDRA HANŽEVAČKI

PETROGENEZA GRANITA I STIJENA SREDNJEG DO VISOKOG STUPNJA
METAMORFIZMA U KAMENOLOMU PUKLICA (ĐULOVAC, PAPUK)

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET

GEOLOŠKI ODSJEK

SANDRA HANŽEVAČKI

PETROGENEZA GRANITA I STIJENA SREDNJEG DO VISOKOG STUPNJA
METAMORFIZMA U KAMENOLOMU PUKLICA (ĐULOVAC, PAPUK)

Diplomski rad
predložen Geološkom odsjeku
Prirodoslovno–matematičkog fakulteta
Sveučilišta u Zagrebu
radi stjecanja akademskog stupnja
magistra geologije

Zagreb, 2015.

Ovaj je diplomski rad izrađen u akademskoj godini 2014./2015., pod vodstvom prof. dr. sc. Dražena Balena, u sklopu Diplomskog studija geologije na Prirodoslovno–matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

ZAHVALA

Posebno se zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Draženu Balenu na strpljenju i uloženom trudu prilikom izrade ovog diplomskog rada, te na brojnim korisnim savjetima i sugestijama bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć.

Zahvaljujem se dr. sc. Zorici Petrinc na pomoći prilikom odabira i pripreme uzoraka. Hvala na korisnim savjetima prilikom interpretacije rezultata i velikoj pomoći u pronalaženju najnovije literature.

Zahvaljujem se gospodinu Dejanu Vončini na savjetima i pomoći prilikom izrade mikroskopskih preparata.

Hvala svim profesorima i asistentima na znanju koje su mi prenijeli tijekom studija. Hvala kolegama s fakulteta bez čijih bi savjeta i naputaka studiranje bilo znatno teže, te Antoneli bez koje sve ove godine studija ne bi bile toliko zabavne.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na ljubavi, strpljenju i podršci tijekom studija, te Andriji koji mi je sve ove godine bio najveća potpora.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	8
1.1. Cilj rada i hipoteza.....	8
1.2. Geografski položaj terena.....	9
2. PREGLED PRETHODNIH ISTRAŽIVANJA.....	10
3. GEOLOŠKA GRAĐA.....	12
3.1. Podloga Panonskog bazen (opisano prema PAMIĆ, 1999)	12
3.1.1. Južnotisijski megablok	12
3.2. Papuk	14
3.2.1. Prekambrij	15
3.2.2. Paleozoik	15
4. GEODINAMSKA EVOLUCIJA.....	17
5. METODE ISTRAŽIVANJA.....	20
5.1. Terensko istraživanje.....	20
5.2. Laboratorijske metode	20
5.2.1. Priprema mikroskopskih preparata.....	20
5.2.2. Priprema uzoraka za cjelostijensku geokemijsku analizu	20
5.3. Instrumentalne metode	21
5.3.1. Mikroskopiranje – optičke metode.....	21
5.3.2. Cjelostijenska geokemijska analiza pomoći ICP – MS.....	21
5.3.3. Geotermobarometrija i Perple_X	22
6. REZULTATI.....	24
6.1. Terensko istraživanje.....	24
6.2. Makroskopski opis uzoraka	27
6.2.1. Graniti.....	27
6.2.2. Gnajsevi.....	28
6.2.3. Pegmatit – aplit.....	29
6.2.4. Biotitni škriljavac	30
6.2.5. Migmatiti	30
6.2.6. Efuzivi	31
6.2.7. Amfibolit	32
6.3. Mikroskopski preparati.....	33

6.3.1.	Graniti.....	33
6.3.2.	Gnajsevi.....	35
6.3.3.	Kontakt granita i gnajseva.....	37
6.3.4.	Aplit.....	38
6.3.5.	Biotitni škriljavac	40
6.3.6.	Migmatiti.....	41
6.3.7.	Efuzivi	43
6.3.8.	Amfibolit	45
6.4.	Geokemijska analiza.....	47
6.5.	Geotermobarometrija.....	52
6.5.1.	Perple_X.....	52
7.	RASPRAVA.....	58
7.1.	Petrografija	58
7.2.	Cjelostijenska geokemijska analiza	61
7.3.	Perple_X	64
7.4.	Usporedba s ranijim autorima.....	64
8.	ZAKLJUČAK	66
9.	KORIŠTENA LITERATURA	67

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno–matematički fakultet

Geološki odsjek

Diplomski rad

PETROGENEZA GRANITA I STIJENA SREDNJEG DO VISOKOG STUPNJA METAMORFIZMA U KAMENOLOMU PUKLICA (ĐULOVAC, PAPUK)

SANDRA HANŽEVAČKI

Rad je izrađen: Mineraloško–petrografski zavod, Horvatovac 95

Sažetak: Istraživani kamenolom nalazi se u blizini malenog naselja Puklica na sjeverozapadnim obroncima Papuka. Stijene u kamenolomu koje čine različiti tipovi gnajseva, granita i migmatita zajedno sa stijenama progresivnometamornog kompleksa predstavljaju osnovnu građevnu jedinicu Papuka i velikog dijela kristaline podloge Panonskog bazena. Na temelju rezultata terenskog istraživanja, mikrofiziografije stijena i mikrotektonike zaključeno je da su migmatiti nastali parcijalnim taljenjem gnajseva. U kasnijim fazama dolazi do utiskivanja granitne magme i nastanka boranih migmatita u središnjem dijelu kamenoloma. Na temelju rezultata kemijske analize zaključeno je da analizirani graniti predstavljaju granite tipične za gornje dijelove kontinetske kore dok su geotermobarometrijskim metodama okvirno određeni PT-uvjeti tijekom nastanka migmatita.

Ključne riječi: anateksis, geotermobarometrija, gnajs, granit, migmatit, Papuk

Rad sadrži: 63 stranice, 37 slika, 3 tablice, 39 literaturnih navoda

Jezik izvornika: Hrvatski

Rad je pohranjen u: Središnja geološka knjižnica, Horvatovac 102a

Mentor: Dražen Balen, prof. dr. sc.

Ocjenjivači: Dražen Balen, prof. dr. sc.

Marijan Kovačić, prof. dr. sc.

Blanka Cvetko Tešović, prof. dr. sc.

Rad prihvaćen: 11. 9. 2015.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb

Faculty of Science

Department of Geology

Master of Geology Thesis

PETROGENESIS OF GRANITES AND MEDIUM-TO-HIGH-GRADE METAMORPHISM ROCKS IN THE PUKLICA QUARRY (ĐULOVAC, MT. PAPUK)

SANDRA HANŽEVAČKI

Thesis completed in: Mineraloško–petrografski zavod, Horvatovac 95

Abstract: The quarry examined in this research is located near the small village named Puklica on the northwestern slopes of Mt. Papuk. Rocks in the quarry, that are represented by various types of gneiss, granites and migmatites, together with the rocks from progressive metamorphic complex, make the constituent parts of Mt. Papuk and most of the crystalline basement of the Pannonian Basin. Based on the field research results, microscopy and microtectonics, it is determined that migmatites formed by partial melting of gneiss. Granite emplacement and formation of folded migmatites in the central parts of the quarry took place after the partial melting. Based on the mineral chemistry results, it is determined that granites in the quarry correspond with granites typically found in the upper continental crust while geothermobarometry provided PT-conditions during the formation of migmatites.

Key words: anatexis, geothermobarometry, gneiss, granite, migmatite, Mt. Papuk

Thesis contains: 63 pages, 37 figures, 3 tables, 39 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Central geological library, Horvatovac 120a, Zagreb

Supervisor: Dražen Balen, prof.dr.sc.

Reviewers: Dražen Balen, prof. dr. sc.

Marijan Kovačić, prof. dr. sc.

Blanka Cvetko Tešović, prof. dr. sc.

Thesis accepted: 11. 9. 2015.

1. Uvod

1.1. Cilj rada i hipoteza

Postanak migmatita ima važnu ulogu u formaciji granitne taljevine i smatra se ključnim u rješavanju problema i objašnjavanju mehanizma diferencijacije kontinentske kore. Iako se migmatiti i velika granitna tijela često mogu pronaći u neposrednom kontaktu na brojnim terenima diljem svijeta, još uvijek postoje brojna otvorena pitanja vezana uz njihovu genezu.

U novije vrijeme migmatizacija se smatra glavnim procesom nastanka granitne taljevine u kori. Međutim, mehanizmi koji dovode do formacije velikih granitnih intruzija iz malenih nakupina taljevine u migmatitima nisu u potpunosti jasni i predmet su brojnih istraživanja.

Istraživanje migmatita i granita u Hrvatskoj je od velikog značaja pošto istoimene stijene zajedno sa stijenama progresivnometamornog kompleksa grade veliki dio kristaline podloge Panonskog bazena. Unatoč tome, broj istraživača koji se bavi problemima vezanim uz postanak migmatita i uz njih vezanih granita je malen. Jedan od razloga zasigurno je činjenica da migmatiti istovremeno pokazuju magmatske i metamorfne karakteristike zbog čega njihovo istraživanje može biti izrazito kompleksno.

Ovaj diplomski rad bavi se istraživanjem granita, migmatita, gnajseva i ostalih magmatskih i metamornih stijena u kamenolomu Šandrovac kod sela Puklica (Đulovac). Najvažnije metode na kojima se temelji rad su terensko istraživanje i mikrofiziografija stijena pomoću kojih su opisane sve stijenske vrste pronađene u kamenolomu, mikrotektonika pomoću koje je opisan postanak stijena, njihovi međusobni odnosi i deformacijske faze te cjelostijenska geokemijska analiza i geotermobarometrijske metode istraživanja. Na temelju analiziranih podataka pokušat će se odrediti tlakovi i temperature postanka odabranih stijena.

1.2. Geografski položaj terena

Istraživani teren nalazi se u blizini malenog naselja Puklica pored Đulovca (Bjelovarsko – bilogorska županija) smještenog između južnih obronaka Bilogore i zapadnih obronaka Papuka. Naselje se nalazi na $45^{\circ}39'16''$ sjeverne geografske širine i $17^{\circ}25'45''$ istočne geografske dužine. Kamenolom Šandrovac smješten je unutar stijenskog kompleksa Papuka, a od Puklice je udaljen oko 4 kilometra (slika 1).



Slika 1. Geografska karta istraživanog terena i šireg područja. Položaj kamenoloma na karti označen je kvadratićem (preuzeto s <http://geografska.auto-karta-hrvatske.com/>). Na manjoj slici prikazana je satelitska snimka kamenoloma (preuzeto s <http://maps.google.com>).

2. Pregled prethodnih istraživanja

Metamorfno – magmatski kompleks Papuka i okolne podloge Panonskog bazena ima složenu geološku građu i tektonsku evoluciju. Tijekom godina mnogi se istraživači bave ovim stijenama te određuju njihov mineralni i kemijski sastav, starost, temperature i tlakove formiranja, tektonske odnose među pojedinim stijenskim tijelima te njihovu genezu.

TAJDER (1955) u svom radu daje pregled granitnih stijena zapadnog Papuka. Opisuje mineralni sastav različitih varijeteta granodiorita, granita i pegmatita. Granodioritni intruziv opisuje kao dio štoka ili batolita koji je prekriven mlađim sedimentima.

RAFFAELLI (1965) proučava paleozojske škriljavce na Ravnoj gori. Zaključuje da su stijene visokog i niskog stupnja metamorfizma nastale iz serije geosinklinalnih sedimenata koji su borani i progresivno metamorfozirani za vrijeme hecinske orogeneze kada je došlo do utiskivanja granitnog plutona.

MARCI (1968) istražuje enklave u granitnim stijenama Papuka te određuje njihovo eruptivno podrijetlo. Na temelju udjela pojedinih mikroelemenata gnajseve Papuka dijeli na ortognajseve i paragnajseve.

TAJDER (1969) piše o magmatizmu i metamorfizmu na području Papuka i Psunja. Spominje migmatizaciju kao neobjašnjeni proces te smatra da su gnajsevi rezultat migmatizacije niskometamornih škriljavaca. Opisuje genezu magmatskih i metamornih stijena te daje cjeloviti prikaz njihove tektonske evolucije, od starijeg paleozoika sve do tercijara.

VRAGOVIC (1969) u svojoj disertaciji daje detaljan prikaz granitnih stijena Papuka. Opisuje mineralni i kemijski sastav granodiorita, adamelita, granita, pegmatita i aplita, različitih tipova orto- i paragnajseva, migmatitskih gnajseva, homogenih i heterogenih migmatita te amfibolita. Zaključuje da se formacija progresivnometamornog kompleksa, uključujući granite i migmatite, odvijala u nekoliko sukcesivnih faza za vrijeme nekog orogenetskog ciklusa. Smatra da granitne stijene koje su izložene na površini predstavljaju rubne i vršne dijelove plutona na Papuku i Krndiji.

SLOVENAC (1978) na temelju sastava mineralnih zrna biotita iz porfiroblastičnog gnajsa, muskovit – biotitnog gnajsa i pegmatita pokušava izvesti zaključke o njihovoj genezi. Određuje relativne temperaturne odnose tijekom kristalizacije navedenih stijena. Porfiroblastične gnajseve određuje kao produkte rekristalizacije sinkinematskih granita, smatra da su paragnajsevi nastali metamorfozom pelitnih sedimenata pri nižoj temperaturi dok su pegmatiti kristalizirali iz željezom osiromašene restmagne.

U radu iz 1982. SLOVENAC na temelju raspodjele Mg, Fe i Mn u biotitima, granatima i amfibolima određuje temperature nastanka granito – metamorfnih stijena. Na temelju rezultata analize zaključuje da je temperatura stvaranja gnajseva oko 600 °C dok je temperatura nastanka kvarcdioritnog neosoma u heterogenim migmatitima nešto viša (oko 700 °C).

LUGOVIĆ (1983) istražuje efuzive sjeverozapadnih dijelova Papuka, uključujući i stijene iz potoka Puklica i kamenoloma Šandrovac. U radu detaljno opisuje njihov mineralni i kemijski sastav. Određuje da su efuzivi najvećim dijelom bazalti i podređeni andeziti koji pripadaju miocenskoj („helvetskoj“) toleitnoj seriji karakterističnoj za područje Panonskog bazena.

PAMIĆ et LANPHERE (1991) istražuju hercinske granitoide slavonskih planina. Detaljno opisuju njihov petrografski sastav, izotopnim datiranjima određuju njihovu starost, a na temelju raspodjele elemenata u tragovima donose zaključke o postanku ovih stijena. Radiometrijskim datiranjem dokazuju da se glavna deformacijska faza odigrala za vrijeme hercinskog orogenetskog ciklusa u okolišu koji se može korelirati s recentnim otočnim (magmatskim) lukovima. Progresivnometamorfne stijene slavonskih planina, uključujući migmatite i S-granite smatraju jedinstvenim, genetski povezanim kompleksom. Na temelju srednjih vrijednosti elemenata u tragovima rade pozitivnu korelaciju između stijena progresivno metamorfnog i Radlovačkog kompleksa. Smatraju da bi niskometamorfne stijene Radlovačkog kompleksa mogle biti potencijalni kandidat za protolite hercinskog magmatsko – metamorfnog kompleksa.

3. Geološka građa

3.1. Podloga Panonskog bazen (opisano prema PAMIĆ, 1999)

Panonski bazen obuhvaća prostor koji je sa zapadne strane omeđen Alpama, sa sjeverne i istočne strane Karpatima, a sa južne i jugoistočne strane Dinaridima. Rasjedni sustav Zagreb – Zemplen dijeli Panonski bazen na dvije geotektonske megajedinice: Pelso na zapadu koji je građen od istočnoalpskih elemenata te Tisija na istoku koja u sebi nosi uglavnom elemente Karpata i podređeno Dinarida (južni dijelovi Tisije). Između ove dvije megajedinice proteže se uska Zagorje – srednjetransdanubijska zona koja ima alpsko – dinaridske značajke. Ona je ograničena Periadriatsko – balatonskim lineamentom sa sjeverozapadne strane i Zagreb – Zemplen rasjednim sustavom sa jugoistočne strane.

Granica između Tisije i sjevernih Dinarida prolazi linijom južno od Moslavačke gore, Psunja, Požeške gore i Dilja, a nakon toga nastavlja prema Hrvatskom podunavlju dalje u Vojvodinu.

PAMIĆ (1999) u podlozi panonskog bazena izdvaja 4 bloka:

- Južnotisijski koji uglavnom grade paleozojske magmatske i metamorfne stijene;
- Sjevernodinaridski koji je građen od paleogensko – krednog fliša i ofiolitnog melanža;
- Zagorsko – srednjetransdanubijski građen od tektonostratigrafskih jedinica južnih Alpa i sjeverozapadnih Dinarida;
- Pohorje – međimurski građen od tektonostratigrafskih jedinica istočnih Alpa i Periadriatskog lineamenta.

3.1.1. Južnotisijski megablok

Stijene ovog bloka otkrivene su na Papuku, Psunju, Krndiji, Moslavačkoj gori te znatno manje na Požeškoj gori. Dije se na znatno zastupljenije paleozojske i nešto manje zastupljene mezozojske formacije.

Paleozojske formacije sastoje se od regionalno metamorfoziranih stijena vrlo niskog, niskog i srednjeg stupnja te migmatita i granita. Regionalno metamorfozirane sekvence niskog stupnja građene su od različitih varijeteta filita, kloritoidnih škriljavaca i zelenih škriljavaca. Formacije srednjeg stupnja metamorfizma građene su uglavnom od

paragnajseva i tinjčevih škriljavaca s manje zastupljenim proslojcima amfibolita i mramora. Regionalno metamorfozirane sekvence vrlo niskog stupnja otkrivene su samo na Papuku i Psunju gdje se izdvajaju kao Radlovačka formacija građena od slejtova i metapješčenjaka s podređenim filitima i kvarcitima. Ove stijene ispresjecane su silovima metagabra i metadijabaza.

Od granitoida razlikuju se S-graniti i I-graniti. S-graniti grade jezgre Papuka i Moslavačke gore, a prostorno su vezani uz migmatite. To su plutoni pretežno granodioritnog sastava površine oko 100 km² (na slavonskim planinama se javlja i nekoliko manjih plutona). I-graniti su znatno manje rasprostranjeni. Obično se javljaju u silovima koji presijecaju jače metamorfozirane stijene. Pretežno su monocognitnog, granodioritnog i tonalitnog sastava. Mogu biti uškriljani i kataklazirani te prelaziti u gnajsg granite.

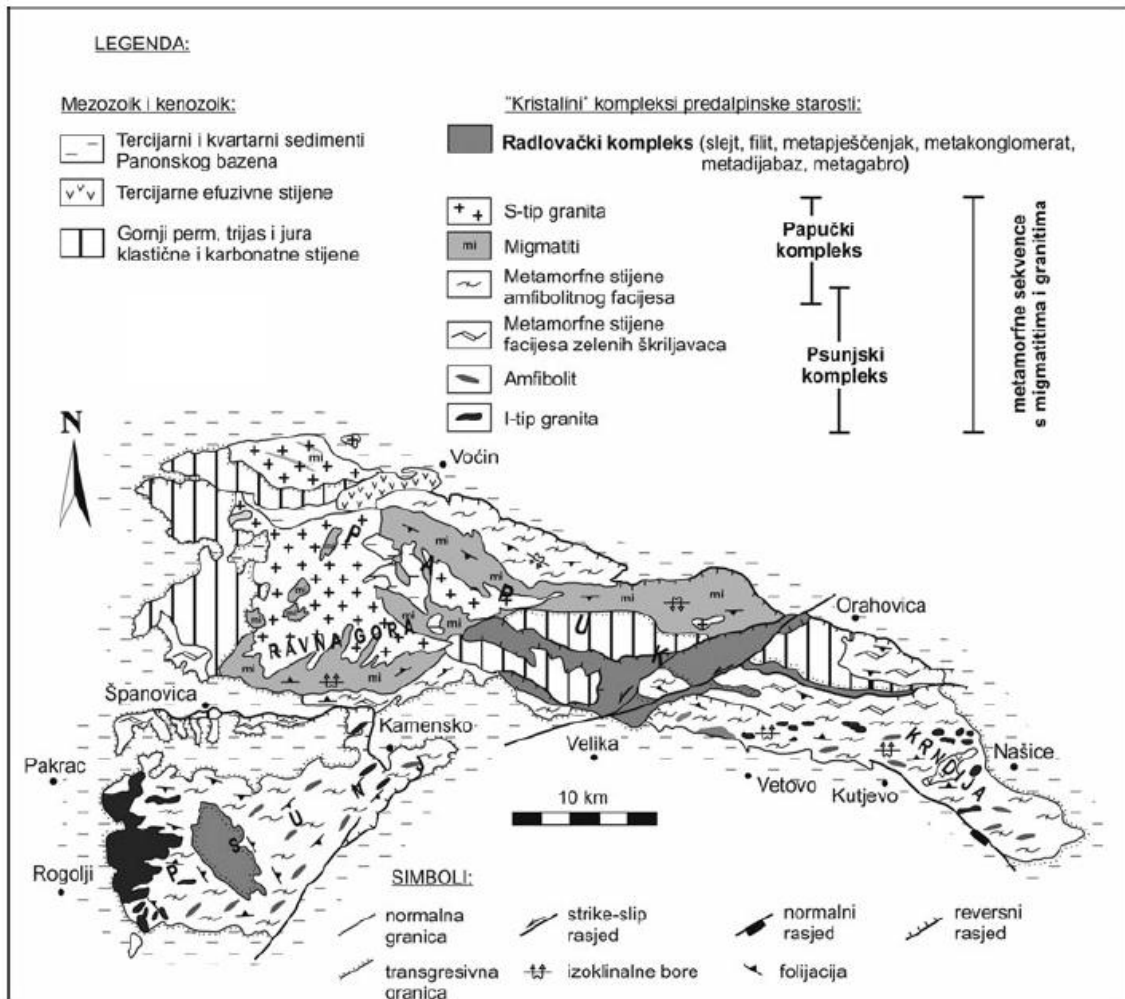
Migmatiti se javljaju na Moslavačkoj gori i Papuku te u njihovim okolnim podlogama. Po sastavu su identični S-granitima. Neosomi u migmatitima su granitnog sastava dok se paleosomi imaju sastav ishodišnih paragnajseva.

Mezozojske formacije su znatno manje rasprostranjene i transgresivno leže na paleozojskim formacijama. Donjotrijaske naslage građene su od klastita, na njima leže srednjotrijaski vapnenci i dolomiti te gornjotrijaski dolomiti. Donja jura građena je od biosparita s rožnjacima. Srednju i dio gornje jure grade vapnenci s proslojcima rožnjaka na koje se nastavljaju gornjojurski – donjokredni vapnenci s ulošcima rožnjaka.

S nekim mezozojskim formacijama pronađeni su pojave metabazalta i metadiorita. Za gornju kredu karakteristični su izljevi bazalta i riolita s pratećim piroklastičnim naslagama i manjim tijelima A-granita.

3.2. Papuk

Slavonske planine, uključujući i Papuk, predstavljaju područja na kojima izdanjuju stijenske formacije Tisije, a građen je od raznovrsnih stijena koje imaju raspon starosti od prekambrija do danas. Glavna masa Papuka građena je od gnajseva i granita s pridruženim migmatitima te stijena progresivnometamornog kompleksa (slika 2).



Slika 2. Pojednostavljena geološka karta Slavonskih planina (prema JAMIČIĆ et al., 1985; JAMIČIĆ i BRKIĆ, 1987; PAMIĆ i LANPHERE, 1991) (preuzeto iz BALEN et al., 2010).

Najdetašniji prikaz geološke građe Papuka nalazi se u tumačima geoloških karata za listove Orahovica (JAMIČIĆ et al., 1987) i Daruvar (JAMIČIĆ et al., 1989) koje će se u ovom poglavlju ukratko opisati.

3.2.1. Prekambrij

Prekambrijske stijene grade južne padine Ravne gore i Papuka te masiv Krndije. Ovaj kompleks zastupljen je kristalastim škriljavcima facijesa zelenih škriljavaca i amfibolitnog facijesa. Amfibolitnom facijesu pripadaju razni varijeteti gnajseva, granita, amfibolita i amfibolskih škriljavaca te mramori i metagabri.

Gnajsevi se međusobno razlikuju po stupnju škriljavosti, a struktura ima varira od lepidogranoblastične do porfiroblastične. Unutar gnajseva mjestimično se pojavljuju flazerirani granitoidi. Amfiboliti, mramori i rjeđe metagabri se pojavljuju u obliku tanjih i debljih uložaka unutar gnajseva. Unutar amfibolita i gnajseva rijetko se javljaju pegmatitne i aplitne žile.

3.2.2. Paleozoik

Stijene starijeg paleozoika grade središnje dijelove Papuka, njegove zapadne i južne padine te područje Ravne gore. Ovaj kompleks sastoji se od tinjčevih škriljavaca, migmatitskih gnajseva koji postepeno prelaze u migmatite i granita, a predstavlja progresivno metamorfozirane geosinklinalne sedimente u rasponu od kloritnog do amfibolitnog facijesa (JAMIČIĆ et al., 1989).

PAMIĆ et LANPHERE (1991) ne uzimajući u obzir podređeno zastupljene stijene mezozoika i neogena dijele stijene Papuka na 4 cjeline:

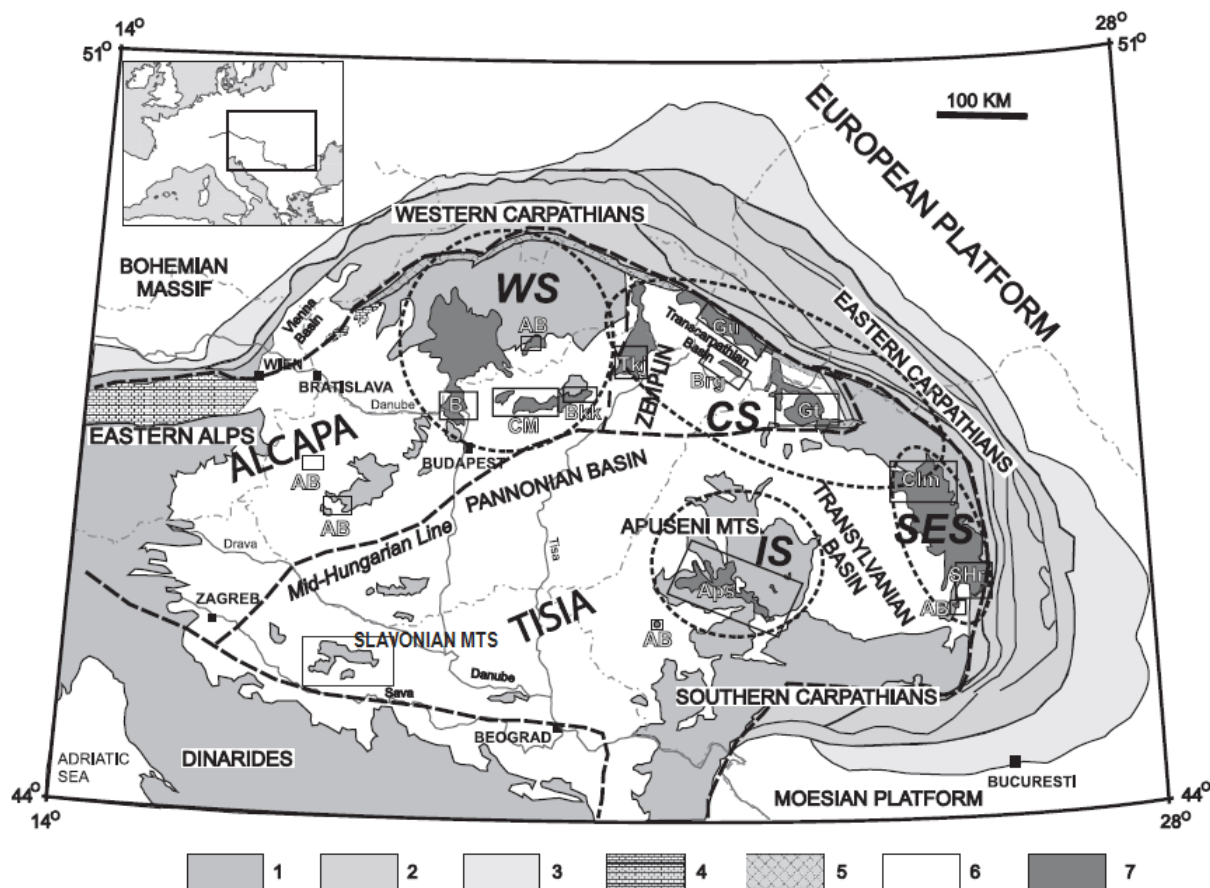
- Semimetamorfni kompleks s metabazitima ili Radlovački kompleks;
- Progresivnometamorfni kompleks;
- I-graniti i kontaktnometamorfne stijene;
- Migmatiti i S-graniti.

Migmatiti i S-graniti zajedno tvore jedinstvenu geološku cjelinu. Leukosomski materijal migmatita zapravo predstavlja S-granite. Zajedno grade najveći dio Papuka odakle se šire do sjeverozapadnih dijelova Krndije, a protežu se dužinom od oko 40 km. Zajedno s ishodišnim stijenama progresivnometamornog kompleksa protežu se u podlozi Panonskog bazena daleko izvan površinskog rasprostiranja slavonskih planina. Graniti se na Papuku pojavljuju kao milimetarske do centimetarske leukosomske žilice u migmatitima te kao granitna tijela različitih dimenzija. U migmatitima se još javljaju kao decimetarske, metarske i dekametarske žile (silovi i dajkovi), zatim kao hektametarska tijela te kao veliki granitni plutoni. Najveći dio S-granita javlja se unutar migmatitnog

kompleksa na središnjim i zapadnim dijelovima Papuka. Radiometrijskim datiranjem uzoraka S-granita prikupljenih na Papuku i u podlozi Panonskog bazena dobiven je raspon starosti od donjeg karbona do donjeg perma, što znači da su nastali za vrijeme hercinskog orogenetskog ciklusa. Migmatite dijele na one nižeg i višeg stupnja migmatizacije. Migmatite nižeg stupnja klasificiraju kao heterogene ili metateksitne migmatite koji su nastali kao produkt nižeg stupnja migmatitne mobilizacije. U njima je dominantan ishodišni (paleosomski) materijal. Migmatite višeg stupnja karakteriziraju kao homogene migmatite koji se prostorno nadovezuju na migmatite nižeg stupnja. U njima se udio paleosomskog materijala smanjuje, stromatitne teksture su izraženije, a leukosom dominira nad melanosomom.

4. Geodinamska evolucija

Geološka građa slavonskih planina vezana je uglavnom uz razvoj magmatsko – metamorfnog kompleksa Tisijske, dok je njihov izgled i današnji alohtoni položaj vezan uz tercijarnu evoluciju Panonskog bazena (slika 3).



Slika 3. Pojednostavljena geološka karta Karpatsko – Panonske regije na kojoj je prikazana prostorna distribucija glavnih građevnih segmenata. LEGENDA: 1 – Unutrašnji Alpsko – karpatski pojas i Dinaridi; 2 – Alpsko – karpatski fliški pojas; 3 – Karpatski molasni pojas; 4 – Vapnenačke Alpe; 5 – Pojas Peniny Klippen; 6 – Neogensko – kartarni sedimenti; 7 – Izdanci kalk – alkalnih vulkanskih stijena (preuzeto iz SEGHEDI et al., 2004 i izmjenjeno).

Tisija koja u sebi nosi elemente Karpata predstavlja fragment otkinut s južnog ruba Euroazijske ploče (PAMIĆ, 1999). U devonu je došlo do formacije subdukcijske zone duž aktivnog južnog ruba Paratethysa u tektonskom okolišu koji se može korelirati s recentnim magmatskim lukovima (PAMIĆ et LANPHERE, 1991).

Granitno–metamorfni kompleks nastaje progresivnom metamorfozom nekog predhercinskog protolita (PAMIĆ et LANPHERE, 1991; VRAGOVIĆ, 1965). Formacija ovoga kompleksa odvijala se u nekoliko sukcesivnih faza koje je u svojoj disertaciji detaljno opisao VRAGOVIĆ (1965). U predorogenetskoj fazi neposredno prije početka

glavne deformacije nastaju I-graniti (TAJDER, 1969; VRAGOVIĆ, 1965; PAMIĆ et LANPHERE, 1991).

U sinorogenetskoj fazi dolazi do utiskivanja granitne magme koja se izdiže iz dubljih dijelova kore. U uvjetima povišene temperature dolazi do progresivne metamorfoze paleozojskih sedimenata do facijesa zelenih škriljavaca i amfibolitnog facijesa. (VRAGOVIĆ, 1965; PAMIĆ, 1999). U područjima s povećanim geotermalnim gradijentom dolazi do migmatitne mobilizacije i taljenja metasedimenata. Parcijalno taljenje počinje pri tlaku 5 – 6 kbar (što odgovara dubini 15 – 20 km) i pri temperaturi od otprilike 600°C (PAMIĆ et LANPHERE, 1991; PAMIĆ et al., 2003). Migmatitna mobilizacija odvija se u temperaturnom rasponu od 670 – 680°C, dok se stvaranje granita odvija pri nešto višoj temperaturi, od 675 – 720 °C (PAMIĆ et LANPHERE, 1991). U rubnim i vršnim dijelovima magmatskih tijela granitne magme intrudiraju u okolne stijene što dovodi do nastanka različitih varijeteta homogenih i heterogenih migmatita.

U postorogenetskoj fazi kada su sinorogenetski graniti u rubnom dijelovima očvršli dolazi do utiskivanja restmagmi iz dubljih dijelova kore iz kojih kristaliziraju leukokratski graniti i granodioriti, te pegmatiti i apliti (VRAGOVIĆ, 1965).

Tisija se odvojila od Europskog kopna u srednjoj juri, a u svoj današnji položaj dolazi tijekom višestrukih složenih pokreta i rotacija u mezozoiku i kenozoiku (SCHMID et al., 2008).

Izdizanje slavnoskih planina i njihov današnji smještaj vezan je uz razvoj Panonskog bazena. Panonski bazen predstavlja zalučnu regiju čiji je razvoj vezan uz karpatski Tethys (PAMIĆ, 1999). Njegova evolucija započinje u donjem miocenu, pred otprilike 20 milijuna godina, u sin – riftnim uvjetima kada dolazi do rotacije dva manja kontinentska fragmenta, Alcapi i Tisije. Alcapi rotira obrnuto od smjera kazaljke na satu dok Tisija rotira u smjeru kazaljke na satu (PAMIĆ, 1999; SEGHEDEI et al., 2004).

U donjem do srednjem miocenu dolazi do kolizije Alcapi i Europskog kontinenta i izdizanja sjevernih dijelova vanjskih Karpata. Izdizanjem gornjih dijelova plašta počinje ekstenzija Panonskog bazena. Naizmjenična marinsko – slatkovodna sedimentacija odvija se uz polifaznu vulkansku aktivnost. (PAMIĆ, 1999; SEGHEDEI et al., 2004).

Tisija se sudara s Europom u srednjem miocenu. Tada je došlo do njezine brze rotacije u smjeru kazaljke na satu za oko 70° . Sjeveroistočni dijelovi Alcape rotiraju za oko 20° obrnuto od smjera kazaljke na satu. (SEGHEDI et al., 2004).

Krajem srednjeg miocena završava riftna faza, dolazi do prestanka deformacija i počinje zapunjavnje Panonskog bazena prvo u brakičnim, a onda u slatkovodnim uvjetima sedimentacije (PAMIĆ, 1999).

Izdizanje horsta slavonskih planina započinje u donjem miocenu. Glavno izdizanje s amplitudom preko 1000 m zbiva se u pliocenu, a traje i danas (PAMIĆ et LANPHERE, 1991; PAVELIĆ, 2001).

5. Metode istraživanja

5.1. Terensko istraživanje

Uzorci za ovaj rad prikupljeni su u različitim dijelovima kamenoloma Puklica u ljetu i jesen 2014. godine. Prvih nekoliko uzoraka je u ljetu s terena donio prof. dr. sc. Dražen Balen.

Terensko istraživanje uključivalo je još dva odlaska na teren, u listopadu i studenom, kada su određene sve stijenske vrste u kamenolomu i proučavani tektonski odnosi među njima. Prikupljeni su dodatni uzorci, a svi izdanci i kontakti među stijenskim tijelima su fotografirani. Sveukupno je prikupljeno oko 25 stijenskih uzoraka koji su odneseni u laboratorij, gdje je odabrano desetak najreprezentativnijih uzoraka na kojima su izvršene daljnje analize.

5.2. Laboratorijske metode

5.2.1. Priprema mikroskopskih preparata

Kako bi se stijenski uzorak mogao promatrati pomoću mikroskopa potrebno je iz njega izraditi preparate. Dio uzorka pilom se izrezao na tanke pločice, debljine oko 4 milimetra. Pločice su se izlomile kako bi odgovarale dimenzijama mikroskopskog staklaca, te su nakon poliranja finim prahom na stakalce zaljepljene uz pomoć Canada balzama.

Kako bi se mogli mikroskopirati, uzorke je bilo potrebno stanjiti do debljine od oko 0.02- 0.03 milimetra. To se izvodilo korištenjem uređaja za brušenje i finih korundskih prahova (granulacija 90) i na kraju ručnim poliranjem (granulacije 240 i 500) kako bi se došlo do željene debljine. Preparati su na nakon brušenja prekriveni pokrovnim stakalcem.

5.2.2. Priprema uzoraka za cjelostijensku geokemijsku analizu

Kako bi se uzorci mogli analizirati pomoću ICP-a potrebno ih je usitniti u prah. Čestice praha moraju biti manje od 0.125 milimetara. Odabrani uzorci prvo se čekićem usitnjavaju na manje komadiće (veličine do nekoliko milimetara), a potom se usitnjavaju u prah u ahatnom mehaničkom mlinu. Praškasti uzorak prosijava se pomoću seta manjih sita. Ukoliko sve čestice nisu u potpunosti prevedene u prah neće proći kroz sita te ih je potrebno ručno usitniti u ahatnom tarioniku.

Dobiveni prah je prije vaganja i odvajanja za analizu potrebno dobro izmiješati kako bi se homogenizirao, zatim se metodom četvrtanja odvaja dio za odvagu kako bi se dobio što reprezentativniji uzorak. Količina uzorka koja je potrebna iznosi oko 12 grama.

5.3. Instrumentalne metode

5.3.1. Mikroskopiranje – optičke metode

Optičke metode koriste se za određivanje mineralnog sastava te strukturnih i teksturnih obilježja stijene. Mikroskopiranje uzoraka vršilo se na polarizacijskom mikroskopu s povećanjem 40-600x, u ortoskopskim uvjetima, s uključenim analizatorom i bez njega. Nakon detaljne analize mikroskopskih preparata snimljene su mikrofotografije uzoraka. Fotografije su snimljene uz pomoć digitalne kamere Canon EOS 550D montirane na mikroskop Carl Zeiss Axiolab uz korištenje objektivna povećanja 2,5, 10 i 20x. Uzorci su fotografirani u prolaznom svjetlu, sa i bez analizatora, a dodatne korekcije fotografija izvršene su u računalnom programu EOS Utility kako bi se dobile realne mikrofotografije.

5.3.2. Cjelostijenska geokemijska analiza pomoći ICP – MS

ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) ili masena spektrometrija pomoću induktivno spregnute plazme je analitička tehnika kojom se određuje udio pojedinih elemenata u uzorku. Uređaj koristi izvor induktivno spregnute plazme koja se nalazi na visokoj temperaturi (6000 – 10 000 K) kako bi se pojedini elementi u uzorku preveli u ione, a njihovo se mjerenje vrši u masenom spektrometru (WOLF, 2005).

Unutar ICP-a nalazi se plemeniti plin argon koji kroz uređaj teče u koncentričnim kanalima (ICP baklja). Kada struja prolazi kroz zavojnicu nastaje oscilirajuće elektromagnetsko polje koje atomima argona uklanja elektrone i pretvara ih u ione. Sudaranjem ovih iona s drugim atomima argona u baklji dolazi do oslobađanja energije u obliku izboja argona (plazma) kojim se bombardira uzorak.

Uzorci u ICP obično ulaze u obliku aerosola. To se postiže otapanjem i raspršivanjem čvrstih uzoraka ili njihovim direktnim prevođenjem iz krutine u aerosol pomoću lasera. Zbog stabilnosti i performansi uređaja otopine koje se analiziraju su jako razrjeđene (do 0,2% otopljene krutine) (WOLF, 2005). Nakon što aerosol uđe u ICP on se u potpunosti disocira, najprije u atome, a zatim u ione.

Nakon što su svi elementi prevedeni u ione oni prelaze u maseni spektrometar. Uzorak izlazi iz ICP-a koji je pri atmosferskom tlaku, prolazi kroz vakuumsku cijev i ulazi u maseni spektrometar.

Ioni se u masenom spektrometru odvajaju na temelju omjera mase i naboja nakon čega ulaze u detektor gdje se vrši mjerenje.

5.3.3. Geotermobarometrija i Perple_X

Geotermobarometrijske metode koriste se za određivanje tlakova i temperatura postanka određenih stijena. U nekim slučajevima, posebice kod metamorfnih stijena, na temelju mineralnog sastava stijene i pojavljivanja određenih mineralnih zajednica moguće je okvirno odrediti raspon temperatura i tlakova pri kojim je stijena nastala. U ozbiljnijem istraživačkom radu takve procjene nisu dovoljne i koriste se kako bi istraživaču olakšale uzorkovanje i terensko istraživanje.

Detaljnije određivanje temperatura i tlakova postiže se određivanjem reakcija kemijske ravnoteže među mineralim prisutnima u stijeni ili mjerenjem kemijskog sastava pojedinih minerala.

Kako bi se odredile ravnotežne reakcije među mineralima u stijeni za određeni raspon tlakova i temperatura potrebni su kemijski podaci dobiveni cjelostijenskom geokemijskom analizom, na temelju kojih se kasnije konstruiraju fazni dijagrami ili pseudopresjeci. Postoje brojni računalni programi koji se koriste za izradu faznih dijagrama, a najčešći i najrašireniji su Thermocalc i Perple_X.

Perple_X je skup programa koji se koristi za izračun i grafički prikaz faznih dijagrama (pseudopresjeka) i termodinamičkih podataka. Najvažniji programi koji čine Perple_X su: Build, Vertex, Pssect, Werami i Pstable.

Kemijski podaci, željenje temperature i tlakovi te postavke koje su potrebne kako bi se izračunali pseudopresjeci unose se u program Build.

Izračun pseudopresjeka vrši se u Vertexu na temelju podataka iz Builda. Ovisno o rasponu željenih temperatura i tlakova izračuni mogu trajati i nekoliko sati, a za iscrtavanje pseudopresjeka koristi se Pssect.

Na temelju izračunatog pseudopresjeka kasnije se mogu konstruirati izoplete, odrediti volumni udjeli pojedinih faza u sustavu itd. Za te izračune koristi se program Werami, a za njihov grafički prikaz služi Pstable.

Krajnji cilj programa je dobiti raspone temperatura i tlakova karakterističnih za određene mineralne zajednice i mogući P-T put kroz koji je stijena prošla. Određuje se sastav i udio svih stabilnih faza s najmanjim iznosom Gibbsove energije, pri svim tlakovima i temperaturama (CONNOLLY, 2005; CONOLLY et PETRINI, 2002). Pošto brojni minerali predstavljaju serije čvrstih otopina čija se Gibbsova energija mijenja s varijacijama u sastavu, Perple_X prilikom izračuna koristi opširne baze podataka u kojima su unaprijed određeni iznosi energija za svaki pseudosastav.

Pseudopresjeci su karakteristični po tome što prikazuju odnose faza za točno određeni kemijski sastav. To znači da su na svakoj točki dijagrama proporcije faza i njihova termodinamička obilježja jedinstveno određeni. Zbog toga su pseudopresjeci veoma korisni za interpretaciju podataka, posebice u metamorfnim sustavima te su bitni za razumijevanje brojnih geoloških procesa (CONNOLLY et PETRINI, 2002).

Za potrebe ovoga rada izračunati su pseudopresjeci uzoraka PUK5 (biotitni škriljavac) i SH-3 (migmatit). Kako bi se mogla odrediti polja stabilnosti i rasponi tlakova i temperatura konstruirani su grafički prikazi s volumnim udjelima minerala koji su uočeni u uzorcima prilikom mikroskopiranja (granat, biotit, fengit, kvarc, feldspati i sillimanit). Grafička obrada pseudopresjeka i dijagrama vršena je u programu Corel Draw.

6. Rezultati

6.1. Terensko istraživanje

U malenom kamenolomu u kojem se odvija aktivna eksploatacija tehničkog kamena, izdanci se protežu dužinom od oko 200 metara. Pošto se eksploatacija vrši cijelom dužinom kamenoloma, sve stijene izložene na površini su relativno svježije što je uvelike olakšalo uzorkovanje i njihovu identifikaciju. Unutar ovoga stijenskog kompleksa uočeni su i identificirani brojni tipovi stijena među kojima su različiti tipovi granita, gnajseva i migmatita. Kontakti između pojedinih stijenskih tijela su oštri, jasno izraženi i veoma se lako uočavaju.



Slika 4. Panoramska fotografija kamenoloma Puklica (stanje u jesen 2014.)

Graniti su većinom krupnozrnati, s velikim kristalima kvarca i feldspata. Udio tinjaca u svim granitima je relativno malen zbog čega su svijetle boje. Sitnozrnatiji primjerci granita mogu se uočiti u neposrednom kontaktu s gnajsevima. U blizini kontakta s migmatitima na njihovoj površini mjestimično se mogu uočiti tanke ljuskaste presvlake muskovita.

Metamorfne stijene u kamenolomu predstavljaju različiti tipovi okcastih gnajseva i ortognajseva. U leukosomima prevladavaju krupni fenokristali (okca) kvarca i feldspata od kojih su neki primjerci veći od 1 centimetra. Debljina leukosomskih slojeva u vanjskom rubnom dijelu kamenoloma doseže nekoliko centimetara, a između njih nalaze se veoma tanke, milimetarske lamine melanosoma građene od tinjaca.

Udaljavanjem od rubnih dijelova kamenoloma struktura gnajseva se postupno mijenja sve do središnjih dijelova u kojima prevladavaju migmatiti. Udio leukosoma u ovim gnajsevima sve je manji smanjuje dok se melanosomski udio povećava. U blizini kontakta

s migmatitima melanosomska komponenta u potpunosti prevladava, a između tamnih slojeva uočavaju se tanki proslojci leukosoma i pojedina rezistentnija okca kvarca ili feldspata. Leukosome su mjestimično toliko tanke da gnasjevi djeluju kao homogene mase bogate tamnim mineralima. Unutar tih manjih masa gnajseva mogu se uočiti nepravilne nakupine leukosoma različitih dimenzija i oblika, od nepravilnih okruglastih nakupina do tanjih nepravilnih žilica.



Slika 5. Fotografije stijena u kamenolomu. Na slici lijevo prikazana su dva različita tipa ortognajseva koje presijeca granitna žila. Na slici desno prikazan je kontakt između granita i migmatitnog gnajsa.

Migmatiti su tamni i višestruko deformirani. Na temelju makroskopskih opažanja mogu se podijeliti na dva strukturna tipa. Prvi tip migmatita je taman, na prvi pogled stijene se čine homogene, a u njima u potpunosti prevladavaju melanosomski proslojci. Nalaze se na nešto većoj udaljenosti od granitnog tijela. Karakteristično izdvajanje debelih leukosomskih slojeva u ovim migmatitima je mjestimično izraženo. Leukosomi su obično tanki, debljine do nekoliko milimetara zbog čega se migmatitne strukture mnogo bolje uočavaju u mikroskopskim preparatima.

Drugi tip migmatita uočava se uz kontakte s granitima. Ove stijene ispresjecane su brojnim granitnim žilama (dajkovima i silovima) debljine preko deset centimetara. U njima se uočava crvoliko izdvajanje leukosomskih proslojaka. Crvići su dugi oko desetak centimetara i debeli oko 2 centimetra, a stvaraju uočljive stromatitne i ptihitne teksture. U blizini granitnih žila izdvajanje leukosoma je više izraženo. Ove žile su uzrokovale razdvajanje pojedinih blokova migmatita u metarske budene. U blizini kontakta unutar granitne mase uočeni su uklopici velikih nepravilnih migmatitnih blokova.



Slika 6. Fotografije stijena u kamenolomu. Na slici lijevo vidi se crvoliko izdvajanje leukosoma u migmatitima. Na slici desno prikazan je kontakt migmatita – migmatitnog gnajsa i granita. Unutar granitne mase vidljiv je uklopak migmatita.

Nešto dalje od migmatita nalaze se biotitni škrljavci. Ove stijene su tamne, kompaktne s jasno izraženom folijacijom i lineacijom.

U blizini kontakta granita i gnajseva pronađena je pegmatitno–aplitna mineralizacija. Veliki metarski blokovi pegmatita odlomljeni su tijekom eksploatacije tako da je njihov primarni položaj unutar kompleksa nepoznat. Pegmatiti se sastoje od velikih centimetarskih kristala kvarca i feldspata između kojih se nalaze listići muskovita. Aplitna mineralizacija okružuje pegmatitsku a sastoji se od sitnih kristala kvarca, feldspata i tinjaca. Unutar aplita se mjestimično mogu uočiti maleni fenokristali granata.

Cijeli magmatsko – metamorfni kompleks je na nekoliko mjesta ispresjecan tamnim metarskim dajkovima efuziva.

6.2. Makroskopski opis uzoraka

6.2.1. Graniti

Analizirani uzorci granita označeni su kao SH-2, SH-9, SH-10 i SH-12 (slika 8). Imaju homogenu teksturu i zrnatu strukturu. Na jednom uzorku tinjci imaju blago izraženu preferiranu orijentaciju. Stijene su uglavnom svijetlosive do sive boje.



Slika 7. Fotografije analiziranih uzoraka SH-2 (gore lijevo), SH-12 (gore desno), SH-9 (dolje lijevo) i SH-10 (dolje desno).

Uzorci imaju veoma sličan sastav: feldspati (45 – 55 vol.%), kvarc (30 – 40 vol.%) i tinjci (3 – 10 vol.%). Omjer svijetlih minerala je sličan kod svih uzoraka dok se omjer tinjaca značajnije mijenja. U nekim uzorcima tinjaca gotovo nema, dok u drugima njihov udio iznosi oko 10% zbog čega su ti graniti nešto tamniji.

Prema terenskoj klasifikaciji za magmatske stijene svi uzorci odgovaraju granitima.

6.2.2. Gnajsevi

Uzorci gnajseva imaju oznake SH-9 (slika 8), SH-7, SH-8 i SH-12 (slika 9), a međusobno se razlikuju po strukturi i udjelima pojedinih minerala zbog čega će se zasebno opisati okcasti i migmatitni gnajsevi.



Slika 8. Fotografije analiziranih uzoraka: SH-7 (gore lijevo), SH-8 (gore desno) i SH-12 (dolje).

Okcasti gnajsevi (SH-7, 8 i 9) imaju škrljavu strukturu i gnajсну okcastu teksturu. Na njima se jasno uočava izmjena tankih melanosoma, debljine do nekoliko milimetara, građenih od tinjaca i značajno debljih leukosoma (debljine do nekoliko centimetara) koji se sastoje od kvarca i feldspata. Unutar leukosoma uočavaju se velika, ponegdje i centimetarska okca feldspata oko kojih povijaju melanosomi.

Migmatitni gnajsevi (SH-12) su znatno tamniji od okcastih gnajseva. Uzorci imaju škrljavu teksturu i gnajсну paralelnu strukturu. Udio svijetlih minerala u njima se postupno smanjuje pa su leukosome sve slabije izražene.

6.2.3. Pegmatit – aplit

Na analiziranom uzorku koji je označen kao SH-18 zajedno se pojavljuju pegmatitna i aplitna mineralizacija (slika 10). Pegmatiti imaju homogenu teksturu i makrokristalinu zrnatu strukturu. Udio pojedinih zrna u uzorku: feldspati (50 vol.%), kvarc (40 vol.%), tinjci (9 vol.%) i granati (1 vol.%).



Slika 9. Fotografija uzorka SH-18

Zrna kvarca i feldspata veličine su do 2 centimetra. Kvarc je staklast i poluproziran, svijetlosive boje, dok su zrna feldspata neprozirna, mliječno bijele do sivobijele boje. Između kvarca i feldspata nalaze se veliki zlatnožuti listići muskovita veličine preko 1 centimetar. Okrugla zrna granata su znatno manja, veličine do 3 milimetra, crvene do crvenosmede boje.

Aplitna mineralizacija ima homogenu teksturu i zrnatu strukturu. Udio pojedinih minerala u aplitu: feldspati (47 vol.%), kvarc (40 vol.%), tinjci (9 vol.%) i granati (3 vol.%). Zrna aplita su znatno manja i ne prelaze veličinu od 3 milimetra. Po udjelima pojedinih minerala i boji identičan je pegmatitu, osim što sadrži nešto veći udio granata.

6.2.4. Biotitni škriljavac

Uzorak je označen kao PUK5. Ima škriljavu teksturu i lepidoblastičnu strukturu. Primarna folijacija u stijeni (S_{0-1}) definirana preferiranom orijentacijom crnih listića biotita blago je borana. Na površini uzorka može se uočiti lineacija izduženja. Zbog malene veličine zrna makroskopski nije bilo moguće odrediti ostale minerale u stijeni.

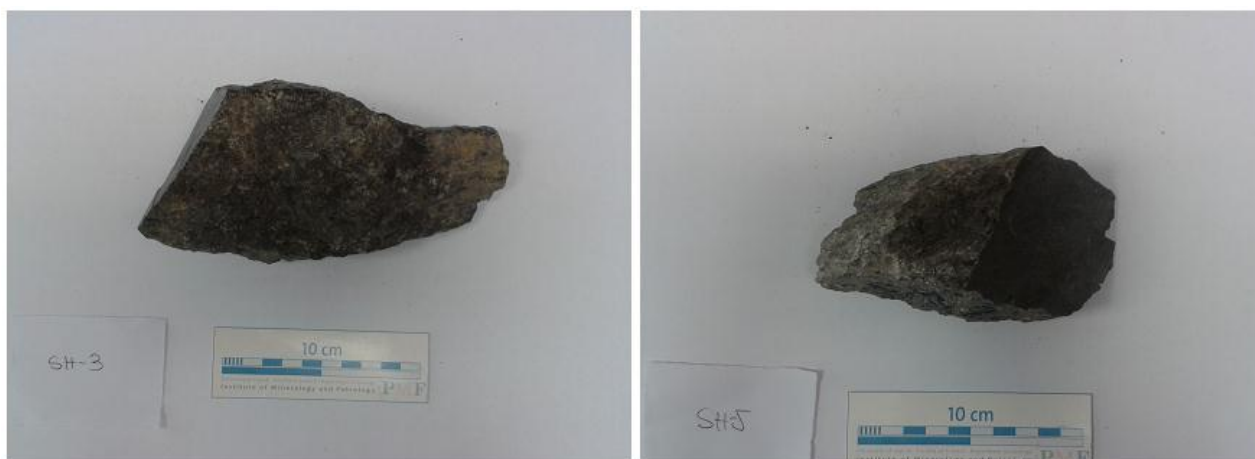


Slika 10. Fotografija uzorka PUK5

6.2.5. Migmatiti

Uzorci migmatita označeni su kao SH-3 i SH-5 (slika 12), a jasno se prepoznaju po karakterističnom izdvajanju leukosoma i melanosoma. Melanosomi su crne boje, a sastoje se od preferirano orijentiranih tinjaca (uglavnom biotita). Leukosomi imaju zrnatu strukturu, a građeni su od kvarca i feldspata. Leukosomi i melanosomi su jednoliko raspoređeni u uzorcima i udio svake frakcije iznosi 50%. Debljina leukosomskih i melanosomskih proslojaka ne prelazi 2 centimetra.

Analizirani uzorci se međusobno razlikuju po strukturi. U uzorku SH-3 primarna stromatitna struktura je višestruko borana. Uzorak SH-5 ima više stromatitnu strukturu, a mjestimično se može uočiti kako melanosomi anastomoziraju oko manjih nakupina leukosoma.



Slika 11. Fotografije analiziranih uzoraka: SH-3 (lijevo) i SH-5 (desno).

6.2.6. Efuzivi

Analizirana su dva uzorka efuziva koji su nazvani SH-16 i SH-17 (slika 13). Oba uzorka imaju homogenu teksturu i porfirnu strukturu. Sastoje se od većih fenokristala plagioklasa, veličine do 2 milimetra koji se nalaze u sitnozrnatom matriksu crne do tamnosive boje.

U uzorku SH-16 udio fenokristala plagioklasa je znatno veći u odnosu na SH-17 u kojem su fenokristali rijetki i ne čine više od 2 vol.% stijene.



Slika 12. Fotografija analiziranih uzoraka: SH-16 (lijevo) i SH-17 (desno)

6.2.7. Amfibolit

Uzorak je označen kao PUK6. Ima škriljavu teksturu i nematoblastičnu strukturu. Na svježem prijelomu vide se tanke crne iglice amfibola između kojih se mjestimično pojavljuju veća zrna tinjaca (veličine do 3 mm). Na površini uzorka nalazi se tanka presvlaka građena od velikih smeđih listića tinjaca (promjera do 1 cm).



Slika 13. Fotografija uzorka PUK 6

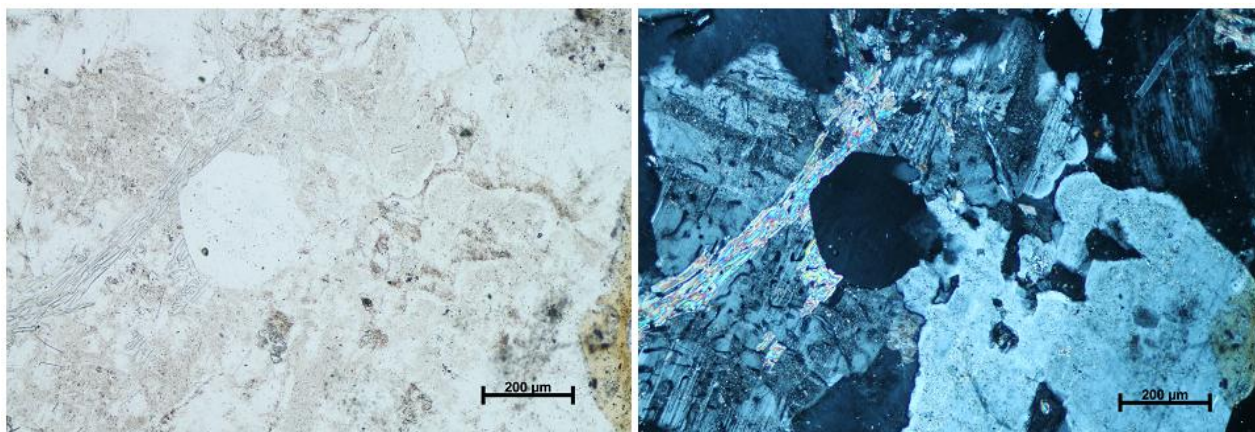
6.3. Mikroskopski preparati

Od 12 stijenskih uzoraka izrađeno je dvadesetak preparata koji predstavljaju sve stijenske vrste pronađene u kamenolomu. Zbog sličnosti u strukturi i mineralnom sastavu iste vrste stijena opisane su zajedno. Sve varijacije u sastavu ili strukturama unutar skupine posebno su naglašene.

Neki uzorci predstavljaju kontakte između dvije vrste stijena. Tako npr. uzorak SH-9 predstavlja kontakt između granita i okcastih gnajseva. Iz ovog uzorka izrađena su tri preparata koja predstavljaju granit, gnajs i kontakt između ove dvije stijene. Granit i gnajs opisat će se zajedno s ostalim granitima i gnajsevima dok će se kontakti među stijenama opisati u zasebnom poglavlju.

6.3.1. Graniti

Svi uzorci granita imaju homogenu teksturu i zrnatu strukturu. Udio pojedinih minerala u svim stijenama je sličan: kalijski feldspati (40 – 50 vol.%), kvarc (35 – 45 vol.%), plagioklasi (3 – 15 vol.%), tinjci (biotit + muskovit) (5 – 10 vol.%), opaki minerali (1 – 2 vol.%). Prema IUGS klasifikaciji za magmatske stijene svi uzorci pripadaju granitima (SH-2, SH-9 i SH-12) ili alkalijsko-feldspatskim granitima (SH-10).



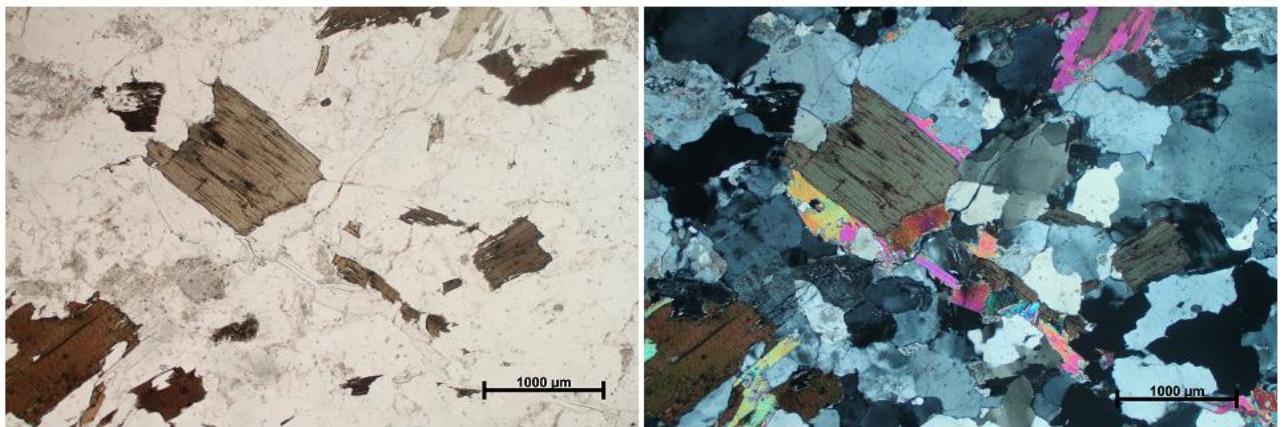
Slika 14. Uzorak SH-12: Pravilno zrno apatita uklopljeno u plagioklasu zajedno s muskovitom. Zrno plagioklasa u rubnim dijelovima počelo je alterirati u sericit. Na površini plagioklasa mogu se uočiti eksolucije. Pored plagioklasa nalazi se veliko zrno kalijskog feldspata s alteracijama u sericit. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

Kalijski feldspati su većinom alotriomorfni (slika 14). Veličina ima varira od 0,1 mm do preko 3 mm. Rubovi zrna su uglavnom nepravilni, a u zonama kontakata s drugim mineralima mogu se uočiti strukture mobilnosti zrna („*pinning*“ i „*window*“ strukture). U sebi najčešće sadrže okrugle uklopke kvarca, plagioklasa ili drugih feldspata te nepravilne uklopke tinjaca. Veća zrna mogu imati undulozno potamnjenje. Duž pukotina kalavosti ili

u središnjim dijelovima zrna mogu biti alterirani u sericit, rjeđe u kaolinit. Na temelju polisintetskih sraslačkih lamela dio feldspata određen je kao mikroklin.

Zrna kvarca su također alotriomorfna, nepravilnih rubova, a veličina im varira od 0,1 do 2 mm. U kvarcu su također uočeni brojni uklopci feldspata i tinjaca te brojnih kvarcnih podzrna. Mogu pokazivati undulozno potamnjenje. Na nekoliko mjesta u preparatima uočene su malene zone u kojima se nalaze pravilna zrna kvarca, plagioklasa i feldspata s kutevima među zrnima od 120° što je znak statičke rekristalizacije.

Plagioklasi su slabo zastupljeni u preparatima, a zrna su im najčešće znatno manja od kvarcnih zrna. Imaju alotriomorfan habitus. Na zrnima su uočene alteracije u sericit i kaolinit koje su znatno više izražene u odnosu na kalijске feldspate, a neka zrna su gotovo u potpunosti izmjenjena. Polisintetske sraslačke lamele su najčešće veoma tanke, a uočeno je nekoliko zrna sa zonarnom građom. U rubnim dijelovima nekih zrna i na kontaktima s kvarcnim zrnima uočene su eksolucije (slika 14). Zbog debljine sraslačkih lamela i izraženih alteracija nije bilo moguće odrediti njihov sastav pomoću kuta iz zone simetrijskog potamnjenja. Prema literaturi (VRAGOVIĆ, 1965; PAMIĆ et LANPHERE, 1991) imaju sastav u rasponu albita do oligoklasa.



Slika 15. Uzorak SH-9: Velika zrna biotita okružena manjim listićima muskovita, nepravilnim zrnima kvarca i manjim zrnima mikrokлина. U gornjem desnom uglu može se uočiti zajednički rast biotita i muskovita koji je karakterističan za sve uzorke. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

Tinjci su znatno manje zastupljeni u alkalno feldspatskim granitima gdje njihov udio iznosi najviše 5%. Listići biotita su hipidiomorfni do alotriomorfni (slika 15) s jasno izraženom kalavosti i pleokroizmom (X' = žuta, Y' = smeđa, Z' =tamnosmeđa do crna). Veličina im varira od 0,1 do 1 mm. Na zrnima su česte alteracije u klorit koje mjestimično

zahvaćaju čitava zrna. Takva zrna imaju smeđe – zelenu boju i slabo izražen pleokroizam. Klorit interferira najčešće u anomalno plavoj, sivoj ili žutoj boji.

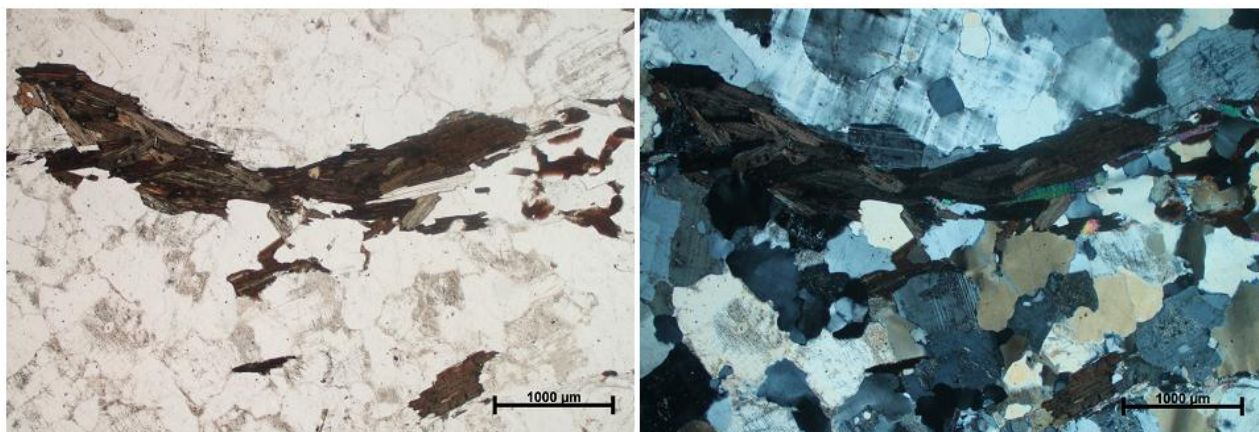
U uzorku SH-10 uočena je blago razvijena folijacija koju definiraju preferirano orijentirani listići biotita.

Listići muskovita su znatno veći i pravilniji od biotita te ne pokazuju znakove trošenja. U preparatima se mogu uočiti pojave koje izgledaju kao proraštanje biotita i muskovita (slika 15). Obično se na zrnima muskovita nalaze znatno manja i jako trošena zrna biotita. Ova pojava mnogo je češća u alkalijsko – feldspatskim granitima.

6.3.2. Gnajsevi

Unutar okcastih gnajseva jasno se razlikuju debeli, centimetarski leukosomi građeni od kvarca, feldspata i nešto malo tinjaca te tanki milimetarski melanosomi građeni uglavnom od tinjaca između kojih mjestimično dolaze manja zrna kvarca ili feldspata.

Kalijski feldspati imaju hipidiomorfan do alotriomorfan habitus, a veličina im varira od 0,1 mm do preko 2 mm (slika 16) . Plagioklasi su većinom sitnozrnati, a pojavljuju se u blizini kontakta s melanosomom. Na svim feldspatima uočene su alteracije najčešće u sericit, rjeđe u kaolinit. Dio plagioklasa je gotovo u potpunosti alterirao u sericit. Unutar velikih zrna kalijskih feldspata nalaze se brojni uklopci od kojih su najzastupljeniji okrugli uklopci manjih zrna kvarca i feldspata.



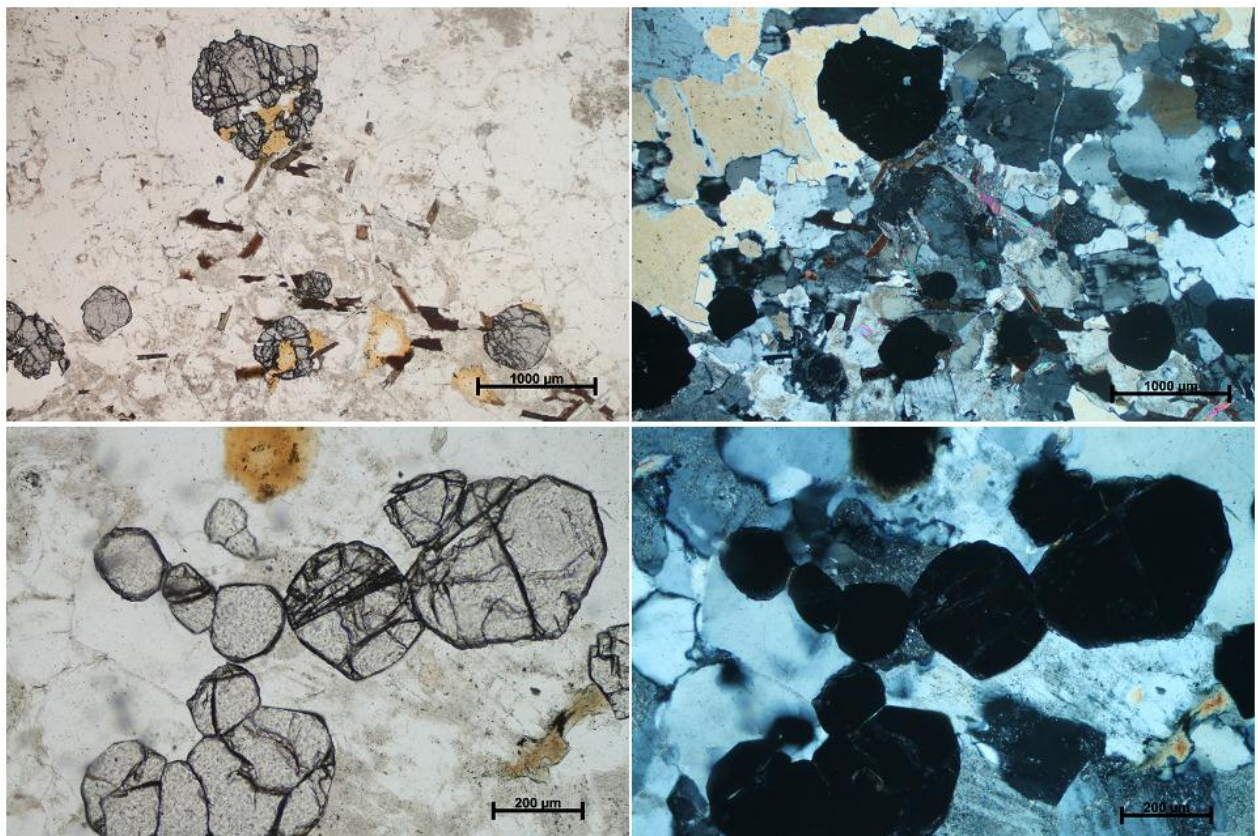
Slika 16. Uzorak SH-8: Tanki melanosom građen od preferirano orijentiranih biotita i nešto malo muskovita. Oko nekih zrna kvarca u leukosomu mogu se uočiti malena podzrna. Iznad melanosoma se nalazi veliko zrno (okce) mikroklina. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

Zrna kvarca su alotriomorfna (slika 16), veličina im varira od 0,1 mm do 1 cm. Neka zrna pokazuju undulozno potamnjenje, a unutar većih zrna mogu se uočiti brojna podzrna ili manji okrugli uklopci feldspata i kvarca.

Listići biotita i muskovita su hipidiomorfni do alotriomorfni, veličine do 2 mm. Zrna unutar melanosoma mogu biti povijena. U gnajsevima je također uočen zajednički rast biotita i muskovita.

Debljina leukosomskih proslojaka u okcastim gnajsevima može iznositi do 2 centrimetra, dok debljina melanosoma rijetko prelazi 2 mm. Veličina leukosomskih zrna je znatno manja u blizini kontakta s melanosomima.

Okca u gnajsevima većinom se sastoje od kalijjskih feldspata. Oko većih okaca obično se nalaze sitnozrnati agregati koji se sastoje od kvarca i feldspata, a oko njih povijaju tanke lamine građene od tinjaca.



Slika 17. Uzorak SH-8: Porfiroblasti granata u sitnozrnatijim žilicama u okcastom gnajsu, pri različitom povećanju. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

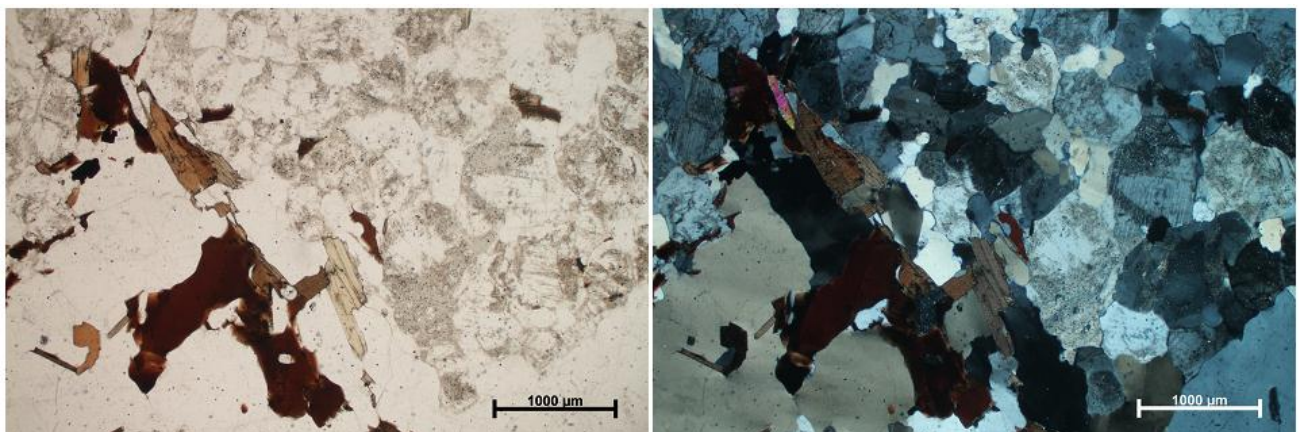
U uzorku SH-8 uočene su dvije žile paralelne folijaciji koje imaju isti sastav kao leukosomi ali su zrna manja u odnosu na gnajs. Duž žile nalazi se desetak porfiroblasta granata (slika 17) idiomorfnog do hipidiomorfnog habitusa. Na kontaktu s melanosomom uočava se nagli prijelaz iz sitnozrnatiye žile u krupnozrnati gnajs dok je na kontaktu s leukosomima taj prijelaz postupan. Tinjci, posebice muskovit su sitnozrnati, trošeni i fragmentirani. Na rubovima nekih muskovita uočene su eksolucije. Zrna kvarca mjestimično imaju oštre rubove te međusobno zadiru jedna u drugo.

Migmatitni gnajsevi imaju sličan sastav kao okcasti gnajsevi. Melanosomi se sastoje od taknih lamina preferirano orijentiranih tinjaca veličine do 0,5 mm, dok se leukosomi sastoje od kalijskih feldspata, kvarca i nešto malo plagioklasa. U migmatitnom gnajsu uočeno je nekoliko porfiroblasta granata.

Iako još uvijek značajno dominiraju nad melanosomom, leukosomski prosljoci su znatno tanji, debljine oko 5 mm. Veličina zrna u leukosomima varira od 0,1 do 2 mm. Zrna međusobno zadiru jedno u drugo, uočen je razvoj brojnih podrzna i „pinning“ strukture.

6.3.3. Kontakt granita i gnajseva

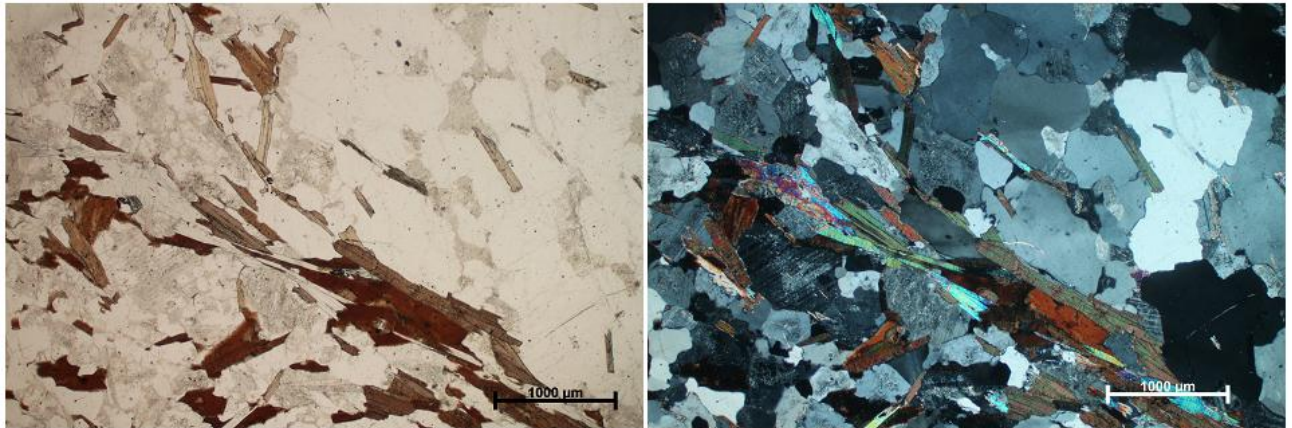
Na kontaktu okcastog gnajsa i granita u uzorku SH-9 (slika 18) nema značajne razlike u veličini zrna koja u obje stijene varira od 0,1 mm do preko 0,5 cm. Udio tinjaca, posebice biotita, je u granitu nešto manji u odnosu na okcasti gnajs.



Slika 18. Uzorak SH-9: Kontakt okcastog gnajsa i granita. U lijevom dijelu slike nalazi se veliko gnajсно okce građeno od nekoliko zrna kvarca i feldspata oko kojeg povija tanki melanosom građen od tinjaca. U desnom dijelu slike nalazi se nešto sitnozrnati granit. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

U gnajsu se tinjci pojavljuju većinom u tankim vrpčastim melanosomima koji povijaju oko velikih zrna feldspata i kvarca dok se u granitu tinjci pojavljuju kao pojedinačna zrna

koja mogu imati blago izraženu preferiranu orijentaciju. Sitnozrnatiiji dijelovi granita su djelomično prošli kroz proces statičke rekristalizacije što se može prepoznati po podjednako velikim poligonalnim zrnima kvarca i feldspata te kutevima među zrnima od 120° .



Slika 19. Uzorak SH-12: kontant sitnozrnatiijeg migmatitnog gnajsa (lijevi dio slike) i krupnozrnatog, tinjcima osiromašenog granita (desni dio slike). PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

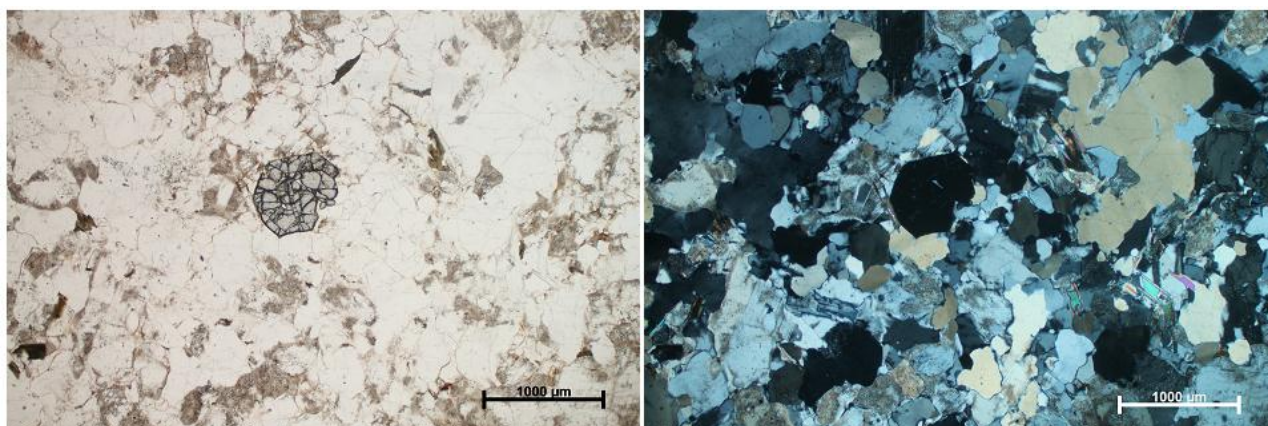
U uzorku SH-12 granitna žila presijeca migmatitni gnajs (slika 19). Granitna žila sastoji se od kalijskih feldspata, kvarca, plagioklasi i tinjaca. Zrna u žili su gotovo dvostruko veća od zrna u gnajsu. Kontakt između granita i gnajsa je tektonski s naglim prijelazom iz gnajsnog melanosomskog materijala u krupnozrnatiiji granitni dio. U žili je također uočena manja enklava migmatitnog gnajsa.

6.3.4. Aplit

Uzorak ima homogenu teksturu i zrnatu strukturu. Udio pojedinih zrna u uzorku je: kalijski feldspati (41 vol.%), kvarc (39 vol.%), plagioklasi (8 vol.%), muskovit (5 vol.%), granati (3 vol.%), biotit (2 vol.%), klorit (1 vol.%), opaki minerali (1 vol.%). Od akcesornih minerala uočeni su cirkoni i apatit.

Zrna kalijskih feldspata su alotriomorfna, veličine do 5 mm. Na nekim zrnima uočene su pukotine kalavosti i mjestimične alteracije u sericit i kaolinit. Dio kalijskih feldspata je na temelju polisintetskih sraslačkih lamela određen kao mikroklin (slika 20). Na kontaktu s kvarcnim zrnima na nekoliko mjesta uočene su eksolucije.

Zrna kvarca su alotriomorfna, izrazito nepravilnih rubova (slika 20). Unutar većih zrna i na njihovim granicama uočena su brojna podzrna i strukture mobilnosti zrna. Kvarcna zrna često zadiru jedna u drugo i mogu pokazivati undulozno potamnjenje.

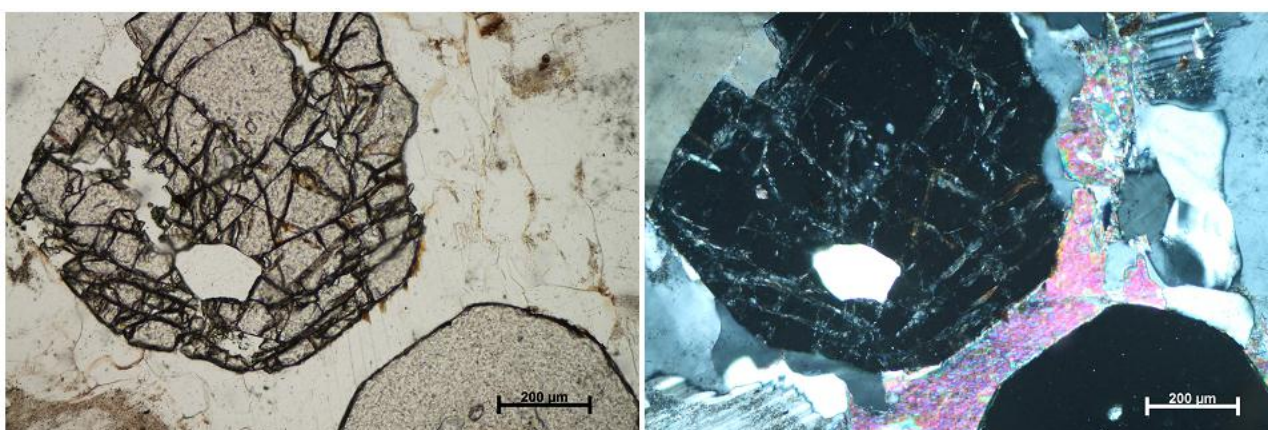


Slika 20. Uzorak SH-18: Izgled aplitne mineralizacije koja se sastoji od kalijevih feldspata, kvarca, plagioklasa i sitnih nepravilnih listića tinjaca. U središnjem dijelu slike može se uočiti pravilni porfiroblast granata. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

Plagioklasi su alotriomorfni. Imaju tanke polisintetske sraslačke lamele. Zbog rekristalizacije granice među lamelama mogu biti nejasne. Alteracije u sericit i kaolinit mjestimično zahvaćaju čitava zrna.

Listići muskovita su hipidiomorfni do alotriomorfni. Znatno su manji u odnosu na kvarc i feldspate (slika 20). Na njima se jasno uočavaju kalavost i pseudoapsorpcija. U aplitu se, isto kao i u granitu, može uočiti pojava zajedničkog rasta jednog dijela muskovita s biotitom.

Porfiroblasti granata su hipidiomorfni, najčešće okruglog habitusa (slike 20 i 21). Zrna mogu biti jako ispucala, a u njima su uočeni uklopoci kvarca, tinjaca i feldspata.



Slika 21. Porfiroblasti granata pri većem povećanju okruženi zrnima muskovita, kvarca i plagioklasa. U većem zrnju može se uočiti nepravilni uklopak kvarca. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

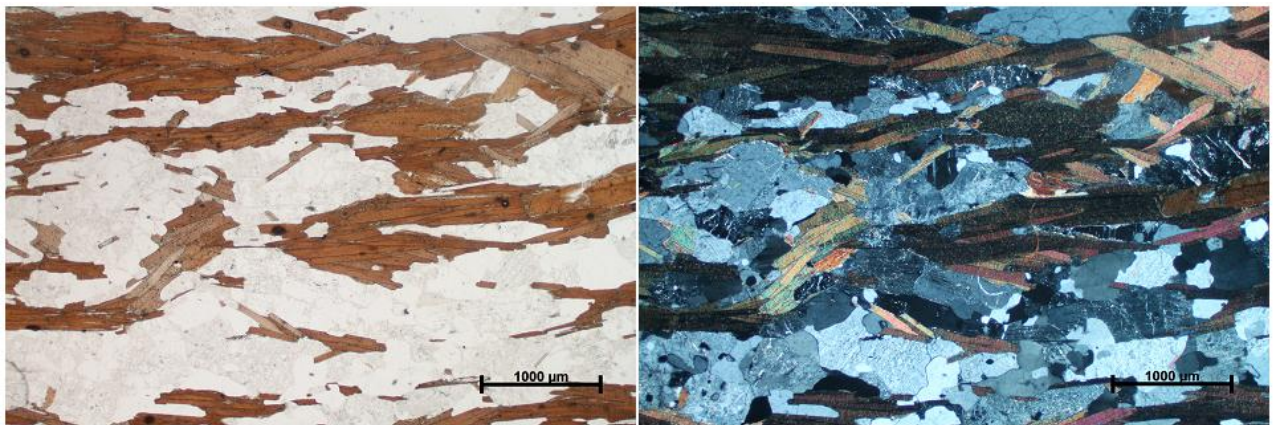
Listići biotita su iznimno sitnozrnati u odnosu na ostale minerale u uzorku. Alotriomorfni su, a veličina im ne prelazi 0,2 mm. Svi biotiti su barem djelomično

alterirani u klorit. U sebi sadrže brojne uklopke opákih minerala. Za sva biotitna zrna karakterističan je zajednički rast s muskovitom.

Klorit se pojavljuje samo kao produkt alteracije biotita. može pokazivati blagi pleokroizam u svijetlozelenim tonovima, a interferira u anomalnoj plavoj, sivoj i žutoj boji.

6.3.5. Biotitni škriljavac

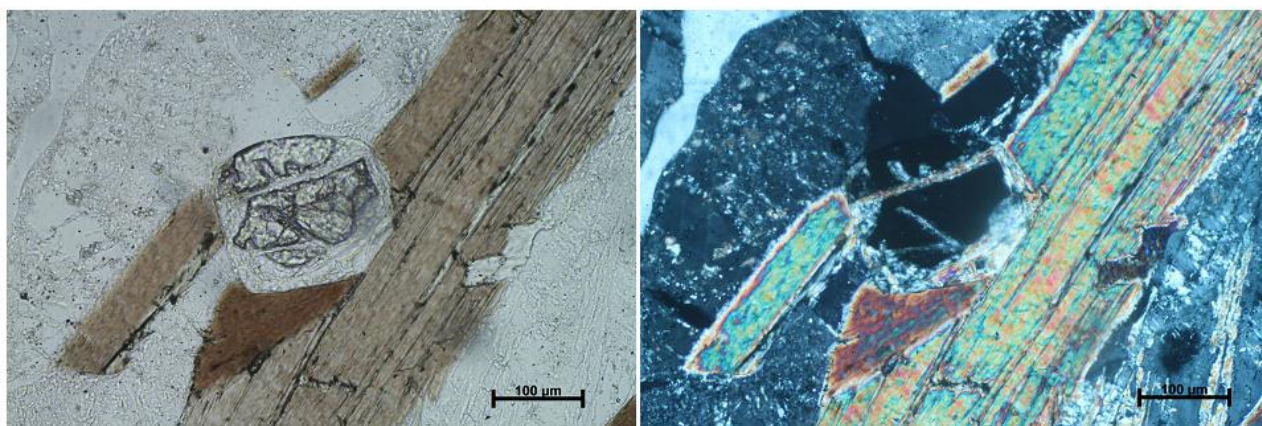
Uzorci imaju škriljavu teksturu i lepidogranoblastičnu strukturu. Folijaciju u stijeni definiraju paralelne lamine preferirano orijentiranih biotita između kojih se nalaze leukosomi građeni pretežno od kvarca i feldspata te nešto malo biotita (slika 22).



Slika 22. Uzorak PUK5: Između tankih biotitnih lamina nalaze se leće ili proslojci kvarca i feldspata. Na slici se mogu uočiti brojna zrna cirkona s crnim metamiktnim ovojkama uklopljena u biotitima. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

Listići biotita su većinom hipidiomorfni i ne pokazuju znakove trošenja (slika 22). Imaju jasno izražen pleokroizam u smeđoj (Y') i žutoj boji (X'). Interferencijske boje su im prekrivene vlastitom bojom. Unutar biotita uočeni su brojni uklopci akcesornih cirkona s metamiktnim ovojkama. Uz biotit u laminama se mjestimično pojavljuju i listići muskovita čiji udio u uzorcima ne prelazi 3%. Na nekoliko mjesta između biotita uočene su pojave vlaknastog fibrolita.

U uzorcima je uočeno nekoliko porfiroblasta granata. Zrna su alotriomorfna, razlomljena, veličine do 2 mm. Oko nekih porfiroblasta nalaze se deblji reakcijski ovoji građeni od veoma sitnozrnatih minerala koje zbog veličine nije bilo moguće identificirati (slika 23).



Slika 23. Uzorak PUK5: Maleni porfiroblast granata na biotitu s debelim ovojem građenim od sitnozrnatog materijala. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

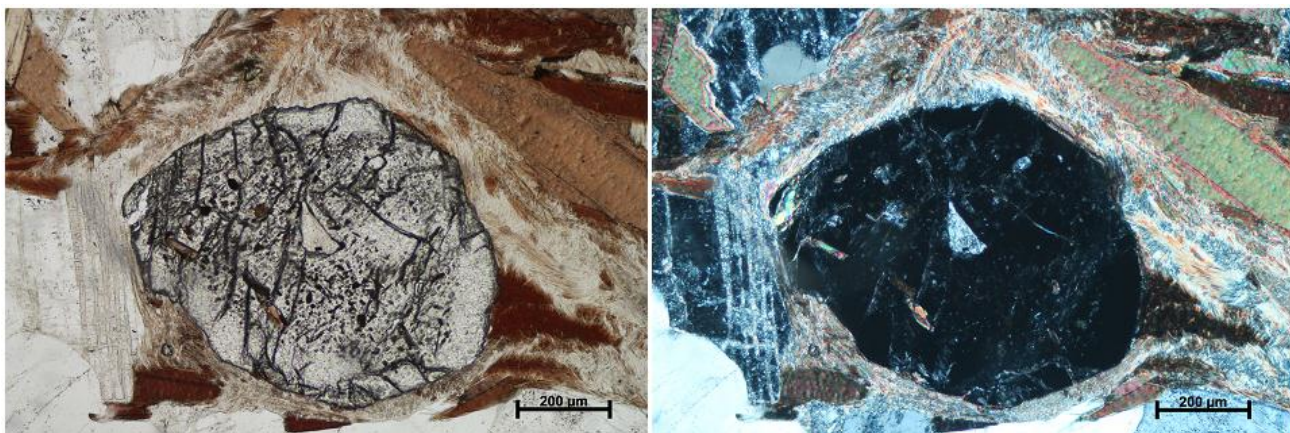
Zrna kvarca su alotriomorfna, veličine do 1 mm. Rubovi zrna su nepravilni i pokazuju undulozno potamnjenje. Mjestimično se mogu uočiti i kvarcna zrna zaobljenih rubova. Kalijski feldspati su također alotriomorfni, veličine do 2 mm. Na svim zrnima uočene su alteracije u sericit i kaolinit. Plagioklasi su alotriomorfni i jako su trošeni zbog čega su polisintetske sraslačke lamele najčešće slabo izražene. Sva zrna značajno su alterirala u sericit i kaolinit.

6.3.6. Migmatiti

Uzorci imaju škriljavu teksturu i migmatitnu strukturu. Udio leukosoma u oba uzorka jednak je udjelu melanosoma.

U uzorku SH-3 primarna folijacija migmatita je naknadno borana. Leukosomi su građeni od kvarca, kalijskih feldspata i plagioklasa. Melanosomi se sastoje od izduženih listića biotita i nešto malo muskovita. U uzorcima se također mogu uočiti brojni porfiroblasti granata (slika 24).

Zrna feldspata su hipidiomorfna do alotriomorfna, veličine do 2 mm. Na većini zrna jasno se uočava kalavost. Duž pukotina kalavosti na nekim primjercima došlo je do sericitizacije. Zrna plagioklasa su gotovo u potpunosti sericitizirana. Mineralna zrna kvarca imaju alotriomorfni habitus, veličine su do 2 mm. Mogu pokazivati undulozno potamnjenje. U rubnim dijelovima kvarcnih zrna uočena su brojna podzrna.



Slika 24. Uzorak SH-3: Porfiroblast granata u melanosomu okružen povijenim zrnima biotita i vlaknastim fibrolitom. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

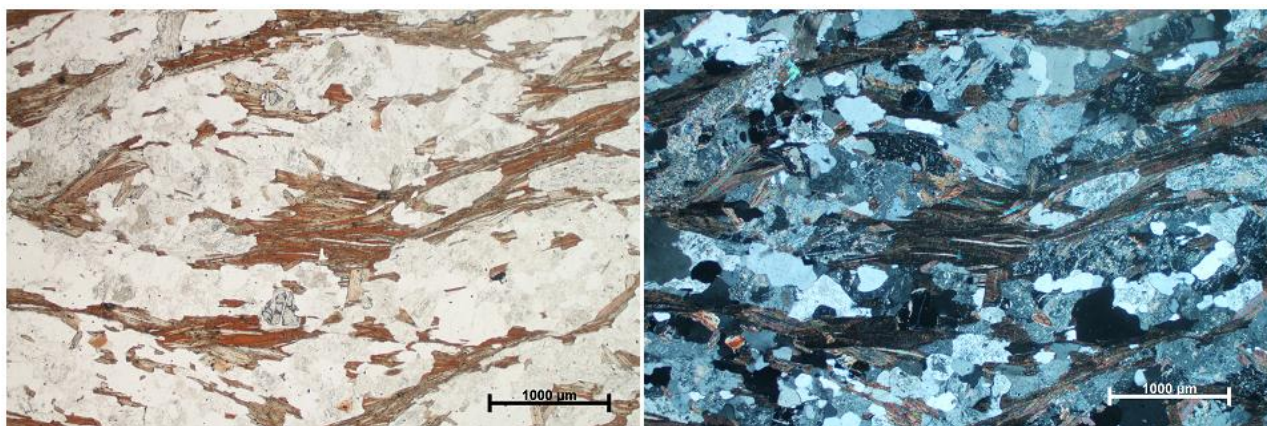
Biotiti u melanosomu imaju hipidiomorfan do alotriomorfan habitus. Na tjemnim dijelovima bora listići mogu biti jako povijeni. Imaju jasno izražen pleokroizam u smeđoj (X') i žutoj boji (Y').

Porfiroblasti granata pojavljuju se u melanosomima između listića biotita te u leukosomima. Granati u melanosomima su hipidiomorfni i nešto su veći od granata u leukosomima. Mogu biti okruženi nakupinama vlaknastog fibrolita i manjim listićima biotita (slika 24).

Porfiroblasti u leukosomima su nepravilnog oblika i nešto su manji. Većina zrna ima oštećene rubove ili je razlomljena. U prostoru između razlomljenih fragmenata kristalizirali su kvarc i feldspati. u svim granatima uočeni su brojni uklopci kvarca, feldspata i tinjaca.

U stromatitnim migmatitima (uzorak SH-5) primarna folijacija je mjestimično blago povijena. Melanosomski proslojci na nekoliko mjesta anastomoziraju oko leća leukosoma, a sastoje se od preferirano orijentiranih biotita (slika 25). Mjestimično se među biotitima mogu uočiti mnogo manji, fragmentirani muskoviti.

Leukosomi su građeni od kalijskih feldspata, kvarca i plagioklasa. Kvarc i kalijski feldspati imaju ista obilježja kao u uzorku SH-3. Zrna plagioklasa su jako trošena. Alteracije u sericit i kaolinit mjestimično zahvaćaju čitava zrna. Na jednom mjestu u preparatu uočeno je nekoliko zrna kalcita koji su najvjerojatnije nastali kao produkt trošenja plagioklasa.



Slika 25. Uzorak SH-5: Izgled leukosoma i melanosoma u stromatitnom migmatitu. U gornjem dijelu slike može se uočiti kako tanki melanosomi anastomoziraju oko leće građene od kvarca i feldspata. PPL N- (lijevo), N+ (desno).

Biotiti u stromatitnim migmatitima u velikom broju su zastupljeni i u leukosomima te nisu strogo koncentrirani u melanosomskim proslojcima (slika 25). Dijelovi preparata podsjećaju na biotitni škriljavac.

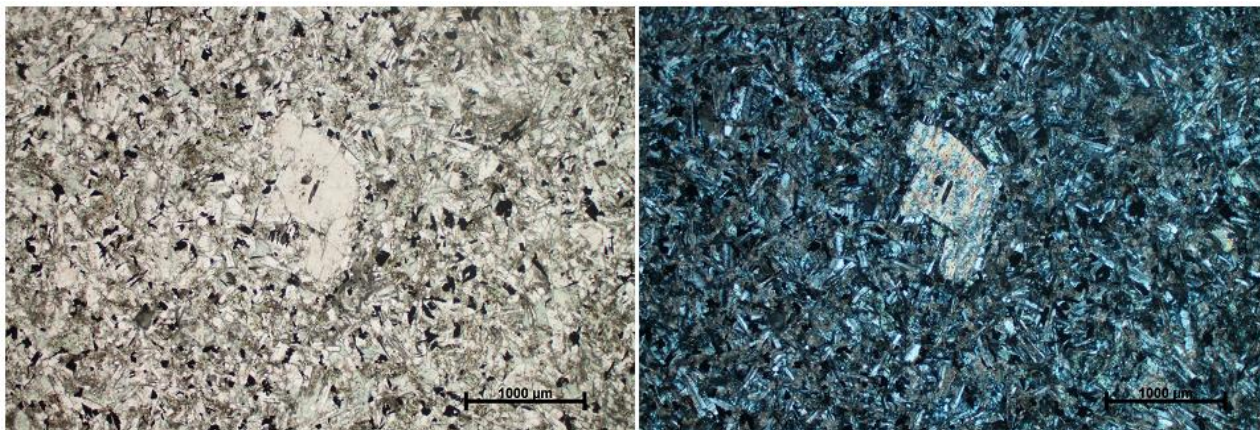
Porfiroblasti granata su manje zastupljeni u odnosu na borane migmatite, a zrna su obično malena i hipidiomorfna.

6.3.7. Efuzivi

Analizirana su dva uzorka efuziva iz dajkova koj presijecaju granite, migmatite i gnajseve. Oba uzorka imaju homogenu teksturu i porfirnu strukturu, a sastoje se od velikih fenokristala plagioklasa okruženih sitnozrnatom matriksom.

U uzorku SH-16 fenokristali plagioklasa imaju alotriomorfan habitus, veličine su do 2 mm (slika 26). Većina zrna je gotovo u potpunosti alterirana u sericit. Udio pojedinih minerala u matriksu: plagioklasi (50 vol.%), klorit (43 vol.%), opaki minerali (7 vol.%). Prema IUGS klasifikaciji za efuzive stijena je andezit.

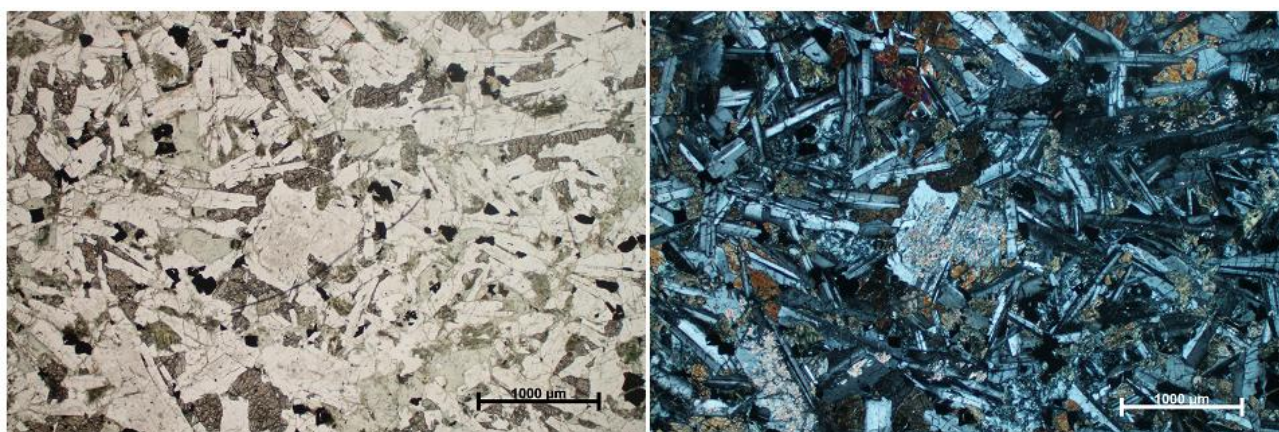
Štapići plagioklasa su većinom hipidiomorfni. Na njima se uočavaju polisintetske sraslačke lamele i rjeđe zonalna građa. Dio plagioklasa u matriksu također je alterirao u sericit. Mjerenjem kuteva iz zone simetrijskog potamnjenja na desetak zrna okvirno je određen sastav plagioklasa. Dobivene vrijednosti variraju u rasponu od 20°- 35° što odgovara rasponu sastava andezin – labradorit.



Slika 26. Uzorak SH-16: Sericitizirani fenokristal plagioklasa okružen sitnozrnatim matriksom građenim od štapića plagioklasa, klorita i opákih minerala. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

Klorit u uzorcima nastao je kao produkt alteracije nekog feromagnezijskog minerala. U kloritima su uočeni uklopci malenih fragmenata koji imaju izražajan pleokroizam u smeđoj i zelenoj boji. Zbog veličine fragmenata nije bilo moguće točno odrediti o kojem se mineralu radi, no pretpostavlja se da je riječ o hornblendi. Zrna klorita pokazuju slabi pleokroizam u svijetlozelenim tonovima, a interferiraju u sivoj i žutoj boji prvog reda.

U uzorku SH-17 fenokristali plagioklasa čine do 5 vol.% uzorka. Imaju hipidiomorfan do alotriomorfan habitus, te su mjestimice u potpunosti alterirali u sericit (slika 27). Matriks se sastoji od štapića plagioklasa (50 vol.%), klinopiroksena (30 vol.%), klorita (25 vol%) i opákih minerala (5 vol%). Prema IUGS klasifikaciji za efuzive stijena je bazalt – andezit.



Slika 27. Uzorak SH-17: Manji sericitizirani fenokristal plagioklasa okružen osnovom koja se sastoji od klinopiroksena, izduženih štapića plagioklasa, klorita i opákih minerala. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

Štapići plagioklasa su idiomorfni do hipidiomorfni. Na njima se jasno uočavaju polisintetske sraslačke lamele i zonarna građa. Nekolicina zrna alterirala je u sericit. Na desetak zrna mjereni su kutevi iz zone simetrijskog potamnjenja. Dobivene su vrijednosti u rasponu od 22° - 31° što odgovara rasponu kuteva za andezin.

Klinopirokseni su alotriomorfni. Zrna su smeđe boje, na njima se jasno uočavaju pukotine kalavosti. Interferiraju u smeđim, žutim i crvenim nijansama drugog reda. Neka zrna su jako razlomljena i fragmentirana, a štapići plagioklasa mjestimično zadiru u njih. LUGOVIĆ (1983) određuje klinopiroksene kao titanski augit.

Klorit je nastao alteracijom klinopiroksena (LUGOVIĆ, 1983) i nekog feromagnezijskog minerala. Unutar nekih zrna uočeni su uklopci sitnih fragmenata s pleokroizmom u zelenoj i smeđoj boji, isto kao i u uzorku andezita. Klorit je također uočen u velikim kuglastim nakupinama radijusa do 4 mm gdje je najvjerojatnije nastao kao posljedica trošenja vulkanskog stakla.

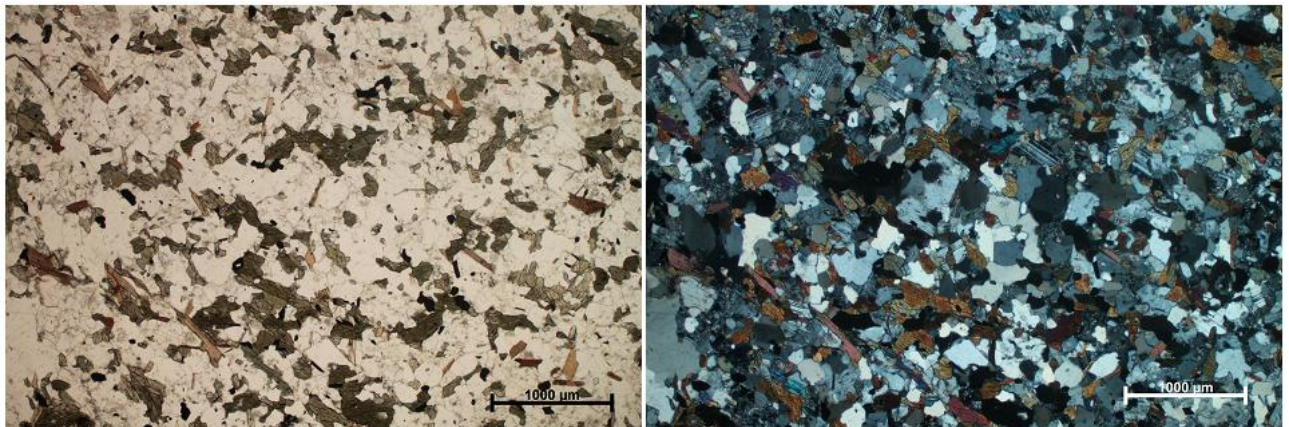
Opaki minerali pojavljuju se kao manja zrna nasumično raspoređena u matriksu te kao uklopci u kloritu.

Važno je napomenuti da se ova klasifikacija stijena razlikuje od one koju je odredio LUGOVIĆ (1983), koji je efuzive iz kamenoloma Šandrovac uzorkovane na nekoliko dajkova klasificirao kao porfirne bazalte.

6.3.8. Amfibolit

Amfiboliti imaju škriljavu teksturu i granolepidoblastičnu strukturu. Uzorci se sastoje od pojedninačnih zrna ili tankih lamina preferirano orijentiranih biotita i hornblende između kojih se nalaze proslojci i leće kvarca i plagioklasa (slika 28).

Hornblenda je alotriomorfna, zrna su nepravilna i razlomljena s izraženim pleokroizmom (X'= zelena, Y'= sivozelena, Z'= smeđa). Interferencijske boje većinom su prekrivene vlastitom bojom.

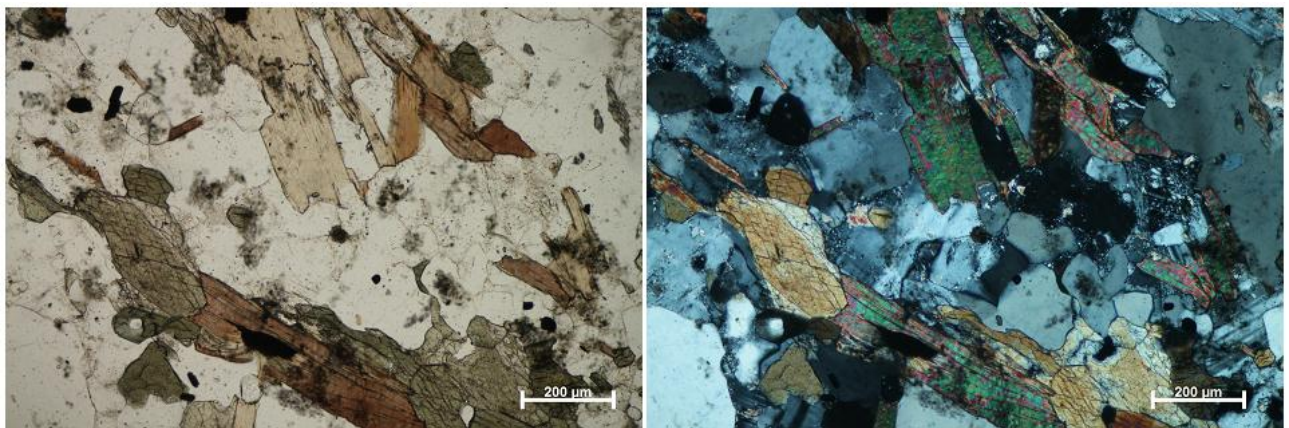


Slika 28. Uzorak PUK6: Preferirano orijentirani hornblenda i biotit između kojih se nalaze kvarc i plagioklasi koji su mjestimično rekristalizirani. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

Biotiti su nešto veći i pravilniji. Preferirana orijentacija kod njih je jače izražena. Pokazuju pleokroizam u smeđoj (Y') i žutoj (X') boji. Biotit i hornblenda u sebi sadrže brojne uklopke opákih minerala.

Plagioklasi su hipidiomorfni do alotriomorfni s izraženim polisintetskim sraslačkim lamelama. Kvarcna zrna mogu biti znatno veća od plagioklasa. Alotriomorfna su i pokazuju undulozno potamnjenje.

Većina manjih zrna kvarca i plagioklasa su poligonalna, podjednake veličine, s kutevima među granicama zrna od 120° što ukazuje na procese statičke rekristalizacije (slika 29).



Slika 29. Uzorak PUK6: Tanka lamina građena od preferirano orijentiranih biotita i hornblende između kojih se nalaze zrna rekristaliziranog kvarca i plagioklasa. PPL, N- (lijevo), N+ (desno).

6.4. Geokemijska analiza

Cjelostijenska geokemijska analiza u masenom spektrometru izvršena je u ACME laboratoriju u Kanadi. U uzorcima su određivane koncentracije glavnih i sporednih elemenata te elemenata u tragovima. Dobiveni rezultati prikazani su u tablicama 1, 2 i 3. Za grafički prikaz rezultata, konstrukciju spider dijagrama i klasifikacijskih dijagrama korišten je program GCDkit3.00 (JANOŠEK et al., 2006).

Tablica 1. Rezultati cjelostijenske geokemijske analize. U tablici su prikazani glavni elementi s pripadajućim mjernim jedinicama i pragom detekcije (MDL- „minimum detection line“).

	SH-2	SH-3	SH-7	SH-10	PUK5	PUK6	Mj. jed.	MDL
SiO₂	74.49	64.29	73.20	72.42	61.52	57.04	%	0.01
Al₂O₃	13.46	15.68	13.82	14.88	17.06	15.53	%	0.01
Fe₂O₃	0.92	6.75	2.25	0.60	6.73	9.93	%	0.04
MgO	0.41	3.19	0.55	0.22	2.82	3.81	%	0.01
CaO	1.09	0.64	1.30	0.51	1.51	6.51	%	0.01
Na₂O	3.03	2.33	3.45	2.89	3.68	2.01	%	0.01
K₂O	4.46	3.74	4.14	7.41	3.16	1.16	%	0.01
TiO₂	0.10	0.80	0.35	0.07	0.77	1.94	%	0.01
P₂O₅	0.13	0.15	0.12	0.08	0.15	0.22	%	0.01
MnO	0.02	0.08	0.04	0.01	0.11	0.17	%	0.01
Cr₂O₃	<0.002	0.011	<0.002	<0.002	0.011	0.004	%	0.002
Sc	3	17	5	2	16	32	ppm	1
LOI	1.70	2.10	0.60	0.70	2.30	1.40	%	-5.10
Total	99.86	99.82	99.86	99.84	99.83	99.76	%	0.01

Među uzorcima postoje razlike u udjelima i koncentracijama pojedinih elemenata, koje su najizraženije ako se promatraju glavni elementi. Udio SiO₂ u svim uzorcima je velik i iznosi više od 60%, s tim da je daleko veći u granitima (SH-2 i SH-10) i gnajsu (SH-7). Graniti i gnajsevi imaju veći udio K₂O i Na₂O u odnosu na ostale uzorke. Migmatiti i biotitni škriljavci imaju veće udjele Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO i TiO₂ te nešto više MnO u odnosu na granit i gnajs. U uzorku PUK6 također se može uočiti povećani udio CaO.

Tablica 2. Sporedni elementi i elementi u tragovima s mjernim jedinicama i pragom detekcije (MDL).

	SH-2	SH-3	SH-7	SH-10	PUK5	PUK6	Mj. jed.	MDL
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	ppm	0.1
As	<0.5	1.0	0.6	2.7	4.5	2.4	ppm	0.5
Au	2.9	2.3	1.4	1.9	1.6	3.1	ppb	0.5
Ba	894	488	667	1273	361	517	ppm	1
Be	3	5	<1	3	<1	3	ppm	1
Bi	<0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	<0.1	ppm	0.1
Cd	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	ppm	0.1
Co	0.9	17.8	3.0	0.6	16.8	27.8	ppm	0.2
Cs	2.5	8.1	4.6	4.9	6.7	1.8	ppm	0.1
Cu	4.9	17.4	5.2	2.6	4.9	35.6	ppm	0.1
Ga	14.7	19.4	17.0	11.4	19.9	20.3	ppm	0.5
Hf	3.9	4.8	6.0	0.6	4.8	5.5	ppm	0.1
Hg	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	ppm	0.01
Mo	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	3.0	1.0	ppm	0.1
Nb	7.2	13.8	10.9	6.0	11.3	8.6	ppm	0.1
Ni	1.3	38.0	3.6	1.2	39.4	5.6	ppm	0.1
Pb	4.6	4.8	3.9	8.3	4.1	5.9	ppm	0.1
Rb	117.9	139.9	132.8	192.3	165.1	38.1	ppm	0.1
Sb	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	ppm	0.1
Se	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	ppm	0.5
Sn	2	2	3	3	5	2	ppm	1
Sr	110.0	73.9	113.3	151.7	106.2	267.5	ppm	0.5
Ta	1.0	1.1	1.3	1.1	0.7	0.8	ppm	0.1
Th	9.6	8.2	18.8	9.0	8.2	4.5	ppm	0.2
Tl	<0.1	0.4	0.3	<0.1	0.7	0.1	ppm	0.1
U	5.0	2.4	3.7	4.0	3.9	1.4	ppm	0.1
V	9	119	25	<8	126	226	ppm	8
W	<0.5	0.7	<0.5	<0.5	2.2	<0.5	ppm	0.5
Y	25.2	25.8	46.8	27.2	30.2	40.6	ppm	0.1
Zn	10	83	40	13	81	40	ppm	1
Zr	120.0	189.0	191.9	12.0	173.3	213.1	ppm	0.1

Tablica 3. Elementi iz skupine rijetkih zemalja (REE) s pripadajućim mjernim jedinicama i pragom detekcije(MDL). Omjeri pojedinih elemenata određeni su prema BALEN et al. (2013) te nadopunjeni prema PEARCE et al. (1984). Uzorci na dnu tablice normalizirani su na hondrit prema BOYTON (1984).

	SH-2	SH-3	SH-7	SH-10	PUK5	PUK6	Mj. jed.	MDL
La	21.7	32.2	34.6	11.7	29.3	19.5	ppm	0.1
Ce	45.3	67.2	73.8	23.9	58.5	41.9	ppm	0.1
Pr	4.98	7.57	8.56	2.82	6.77	5.92	ppm	0.02
Nd	18.9	30.8	33.5	11.0	27.5	25.4	ppm	0.3
Sm	4.12	6.00	6.88	3.09	5.61	6.49	ppm	0.05
Eu	0.70	1.17	0.73	0.61	1.19	1.74	ppm	0.02
Gd	4.58	5.51	7.40	3.37	5.70	7.01	ppm	0.05
Tb	0.79	0.81	1.29	0.65	1.00	1.21	ppm	0.01
Dy	4.60	4.63	7.73	4.51	5.63	7.12	ppm	0.05
Ho	0.81	0.98	1.67	0.96	1.13	1.53	ppm	0.02
Er	2.13	2.70	4.84	2.77	3.49	4.27	ppm	0.03
Tm	0.27	0.40	0.64	0.50	0.54	0.62	ppm	0.01
Yb	1.52	2.60	4.27	3.67	3.82	4.12	ppm	0.05
Lu	0.23	0.41	0.56	0.61	0.58	0.62	ppm	0.01
K/Cs	14810	3833	7471	12554	3915	5350		
Zr/Hf	30.77	39.38	31.98	20.00	36.10	38.75		
Zr/Sc	40.00	11.12	38.38	6.00	10.83	6.66		
Zr/Th	12.50	23.05	10.21	1.33	21.13	47.36		
Th/Co	10.67	0.46	6.27	15.00	0.49	0.16		
Th/Sc	3.20	0.48	3.76	4.50	0.51	0.14		
Th/Ta	9.60	7.45	14.46	8.18	11.71	5.63		
Th/U	1.92	13.42	5.08	2.25	2.10	3.21		
Co/Th	0.09	2.17	0.16	0.07	2.05	6.18		
Hf/Sc	1.30	0.28	1.20	0.30	0.30	0.17		
La/Co	24.11	1.81	11.53	19.50	1.74	0.70		
La/Y	0.86	1.25	0.74	0.42	0.97	0.48		
La/Yb	14.28	12.38	8.10	3.19	7.67	4.73		
La/Sc	7.23	1.89	6.92	5.85	1.83	0.61		

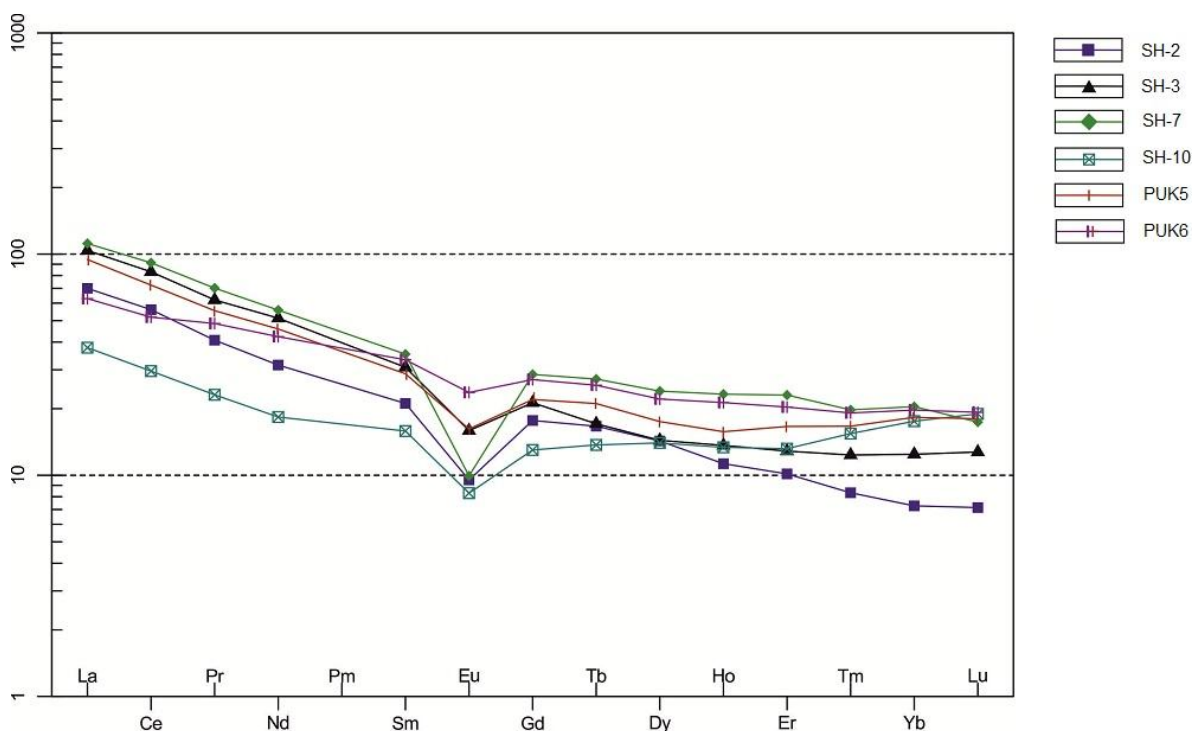
La/Sm	5.27	5.37	5.03	3.79	5.22	3.01		
La/Th	2.26	3.93	1.84	1.30	3.57	4.33		
La/Ni	16.69	0.85	9.61	9.75	0.74	3.48		
Y/Ni	19.38	0.68	13.00	23.08	0.77	7.25		
(La/Yb)_N	9.62	8.35	5.46	2.15	5.17	3.19		
(La/Sm)_N	3.31	3.38	3.16	2.38	3.29	1.89		
(Gd/Yb)_N	2.43	1.71	1.40	0.74	1.20	1.37		
Eu/Eu*	0.49	0.62	0.31	0.58	0.64	0.79		
ΣREE	110.63	162.98	186.47	70.16	150.76	127.45	ppm	

Po uzoru na BALEN et al. (2013) izračunati su omjeri odabranih elemenata koji se mogu koristiti prilikom interpretacije rezultata. Omjer Th/Ta dodan je u tablicu po uzoru na PEARCE et al. (1984).

Ti, Zr, Nb, Hf i Y tijekom frakcijske kristalizacije i anateksisa preferiraju zadržavanje u taljevini pa će krajnji produkti kristalizacije biti obogaćeni na ove elemente (NYAKAIRU et KOEBERL, 2001). Veći iznosi omjera La/Sc i Th/Sc te povišene koncentracije Th, Hf i REE karakteristični su za kisele stijene (NYAKAIRU et KOEBERL, 2001; BIŠEVAC et al., 2013). Stijene gornje kontinentske kore pokazuju obogaćenje na LREE, imaju izraženu negativnu Eu anomaliju i visoke iznose ΣREE (BALEN et al., 2013). Graniti gornje kontinentske kore nastali parcijalnim taljenjem metasedimenata imaju povišene LREE vrijednosti u odnosu na hondrit, te niže vrijednosti LREE u odnosu na protolit (SOLAR et BROWN, 2001). Veliki iznosi omjera Th/Ta te obogaćenje na K, Rb, Ba, Th, Ce i Sm karakteristični su za granite otočnih lukova (PEARCE et al., 1984).

Međusobnom usporedbom podataka u tablici 3 može se uočiti da okcasti gnajs (SH-7) ima najveće koncentracije REE. U migmatitu (SH-3) i biotitnom škriljavcu (PUK5) koncentracije su nešto niže u odnosu na gnajs, što se vidi po ΣREE ali i omjerima pojedinih elemenata. Najmanje koncentracije REE su u granitima (SH-2 i SH-10), s tim da se uzorak SH-10 značajno razlikuje u odnosu na sve analizirane stijene.

Radi bolje preglednosti podataka i lakšeg međusobnog uspoređivanja, uzorci su normalizirani na određene standarde. Na slici 30 prikazana je raspodjela REE u uzorcima koji su normalizirani na hondrit prema BOYTON (1984).

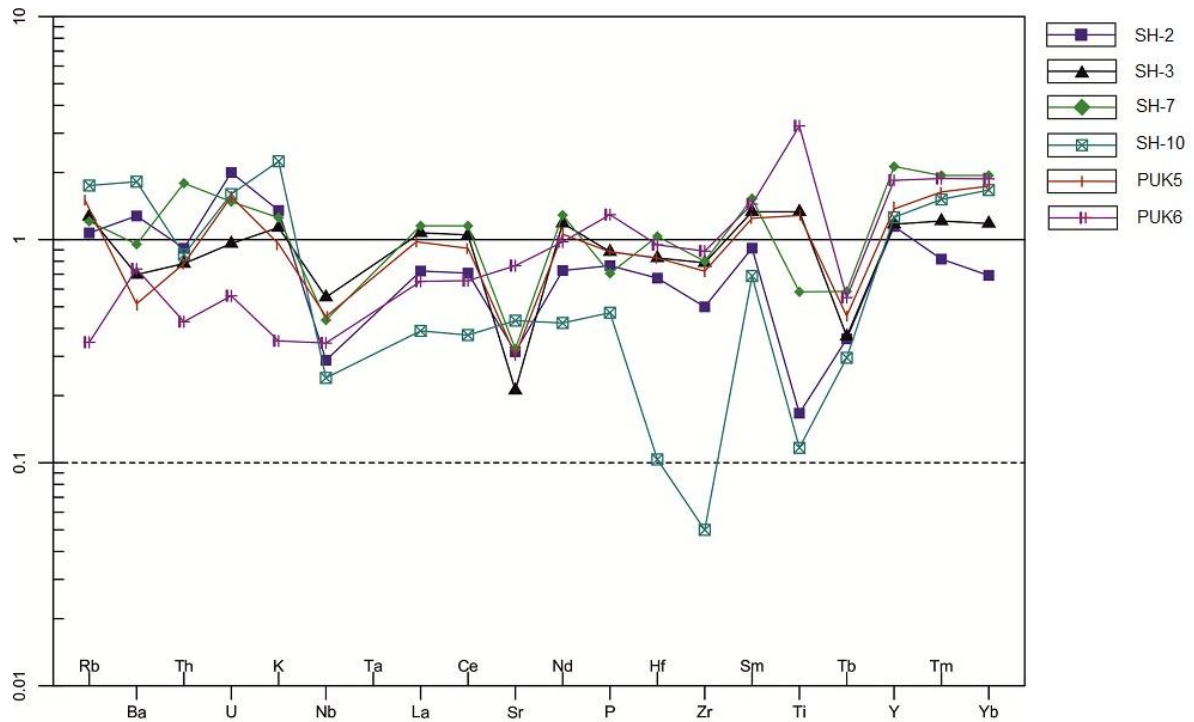


Slika 30. Spider dijagram koji prikazuje analizirane uzorke normalizirane na hondrit prema BOYTON (1984).

Raspodjela REE u uzorcima je veoma slična. Svi uzorci pokazuju blago obogaćenje na LREE i imaju izraženu negativnu Eu anomaliju. Jedina iznimka je uzorak PUK6 kod kojeg gotovo nema obogaćenja na LREE, a negativna Eu anomalija je tek neznatno izražena.

Uzorci normalizirani na gornju kontinentsku koru (slika 31) pokazuju značajne varijacije u koncentracijama pojedinih elemenata. Svi uzorci pokazuju osiromašenje na Nb, Ta i Sr dok im je raspodjela Ce proporcionalna s onom u gornjoj kontinentskoj kori.

Uzorci granita (SH-2 i SH-10) pokazuju blago obogaćenje na Ba i osiromašenje na Ti. Uzorak SH-2 blago je obogaćen na U. SH-10 ima znatno manje koncentracije La, Ce, Nd i P u odnosu na ostale uzorke te izraženo osiromašenje na Hf i Zr. Migmatit (SH-3) ima blago povećane koncentracije Cs i Ti. Gnajs (SH-7) pokazuje blago obogaćenje na Th i osiromašenje na Ti. Biotitni škriljavec (PUK5) ima sličnu raspodjelu elemenata kao migmatit, osim blagog osiromašenja na Ba i Ta. Amfibolit (PUK6) ima znatno manje koncentracije Cs, Rb, Th i U u odnosu na ostale uzorke, nešto veće koncentracije P i izraženo obogaćenje na Ti.



Slika 31. Spider dijagram koji prikazuje uzorke normalizirane na gornju kontinentski koru prema TAYLOR et MCLENNAN (1995).

6.5. Geotermobarometrija

6.5.1. Perple_X

Na slikama 32 i 34 prikazani su pseudopresjeci konstruirani na temelju geokemijskih podataka za uzorke PUK5 i SH-3. Izračun je izvršen u jedanaestokomponentnom sustavu MnNCKFMASHTO ($\text{MnO}-\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{Fe}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{O}_2$). Temperaturni raspon na pseudopresjecima je od 400°C do 750°C, a raspon tlakova je od 2 do 14 kbara.

Korišteni su sljedeći modeli minerala: Gt(HP) za granat, Opx(HP) za ortopiroksen, IlGkPy za ilmenit, hCrd za kordijerit, MtUl(A) za magnetit, St(HP) za staurolit, Pheng(HP) za fengit, Mica(M) za tinjce, feldspar za feldspate, Ep(HP) za epidot, Omph(HP) za omfacit, Carp(M) za karpolit, Stlp(M) za stilpnomelan, Sud(M) za sudoit,

GlTrTsPg za amfibol, TiBio(HP) za biotit, Chl(HP) za klorit, Ctd(HP) za kloritoid i melt(HP) za taljevinu.

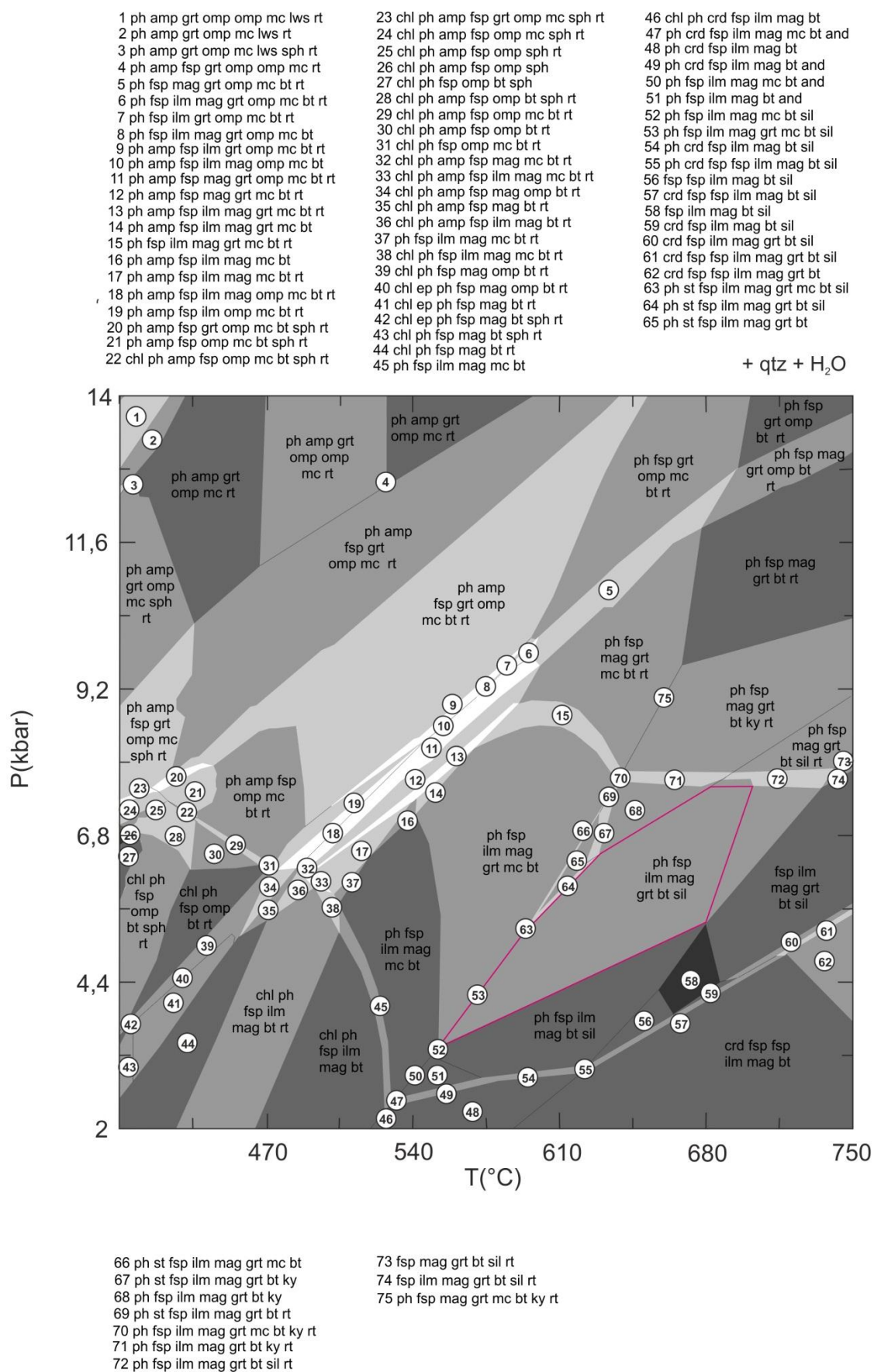
U velikim poljima mineralne faze su ispisane kraticama. Manjim poljima u kojima nije bilo moguće ispisati faze dodjeljeni su brojevi, a sastav pojedinih faza ispisan je iznad ili ispod pseudopresjeka. Najmanja polja i njihove faze su izostavljeni.

Umjesto punih imena faza korištene su sljedeće kratice: grt–granat, ph–fengit, amp–amfibol, omp–omfacit, mc–tinjci, sph–titanit, rt–rutil, fsp–feldspati, bt–biotit, ilm–ilmenit, mag–magnetit, chl–klorit, crd–kordijerit, and–andaluzit, ky–kianit, sil–silimanit, lws–lawsonit, ep–epidot, opx–ortopirokseni i liq–taljevina. Kvarc i voda u uzorku PUK5 pojavljuju se u svim fazama zbog čega su navedeni iznad pseudopresjeka. U uzorku SH-3 u svim fazama pojavljuje se samo kvarc. Za oba uzorka izračunati su volumni udjeli svih mineralnih vrsta koje su uočene u preparatima.

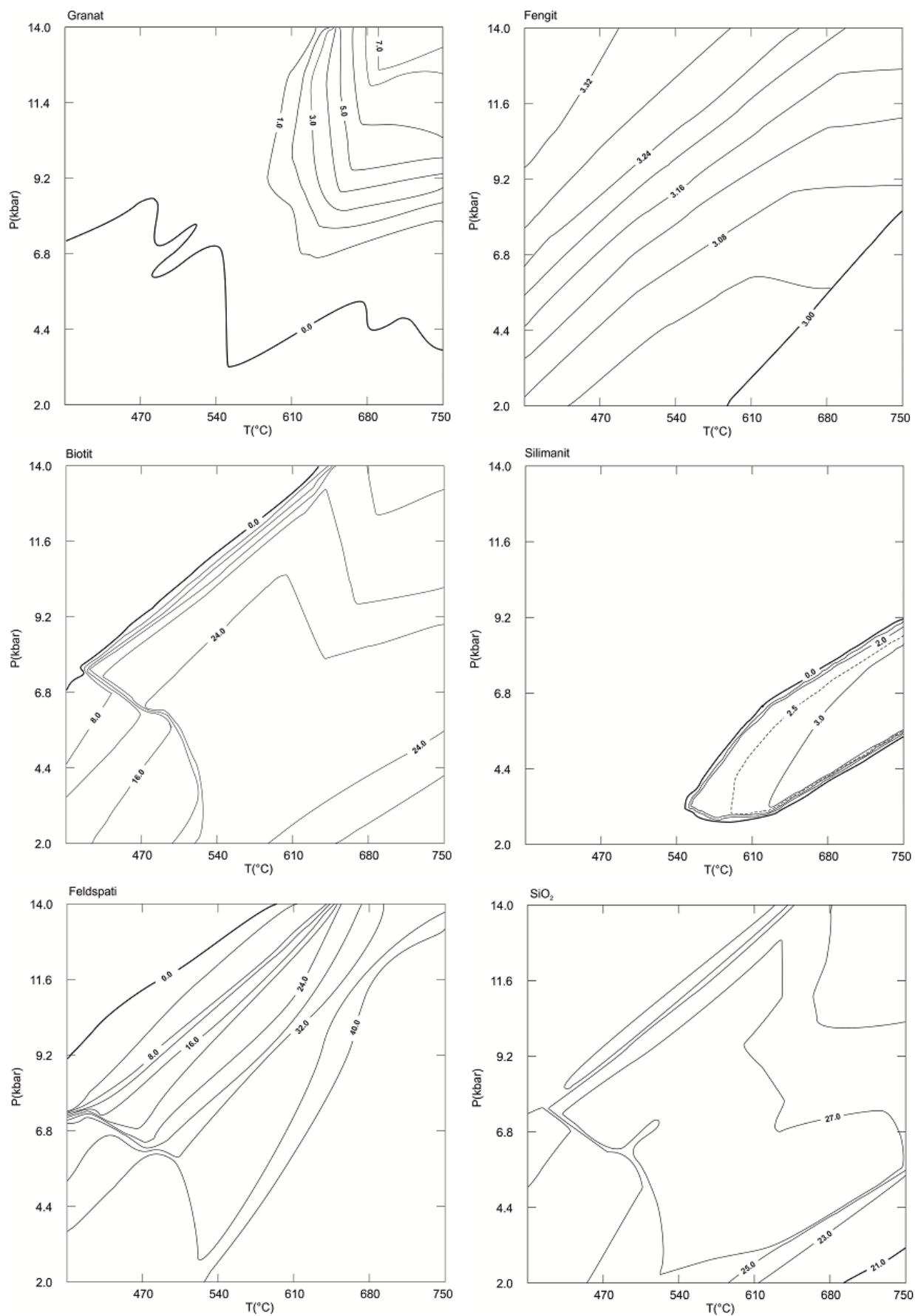
Preklapanjem pseudopresjeka konstruiranih za uzorke biotitnog škriljavca (PUK5) i migmatita (SH-3) s volumnim udjelima granata, fengita, biotita, silimanita, kvarca i feldspata (slike 33 i 35) uspješno su određena polja stabilnosti na pseudopresjecima (na slikama označena ružičastom bojom) u kojima se pojavljuju svi navedeni minerali.

Za uzorak biotitnog škriljavca (slika 32) određeno je veliko polje koje sugerira da je stijena nastala u rasponu temperatura od 550 do 700°C i rasponu tlakova od 3,5 do 7,6 kbara.

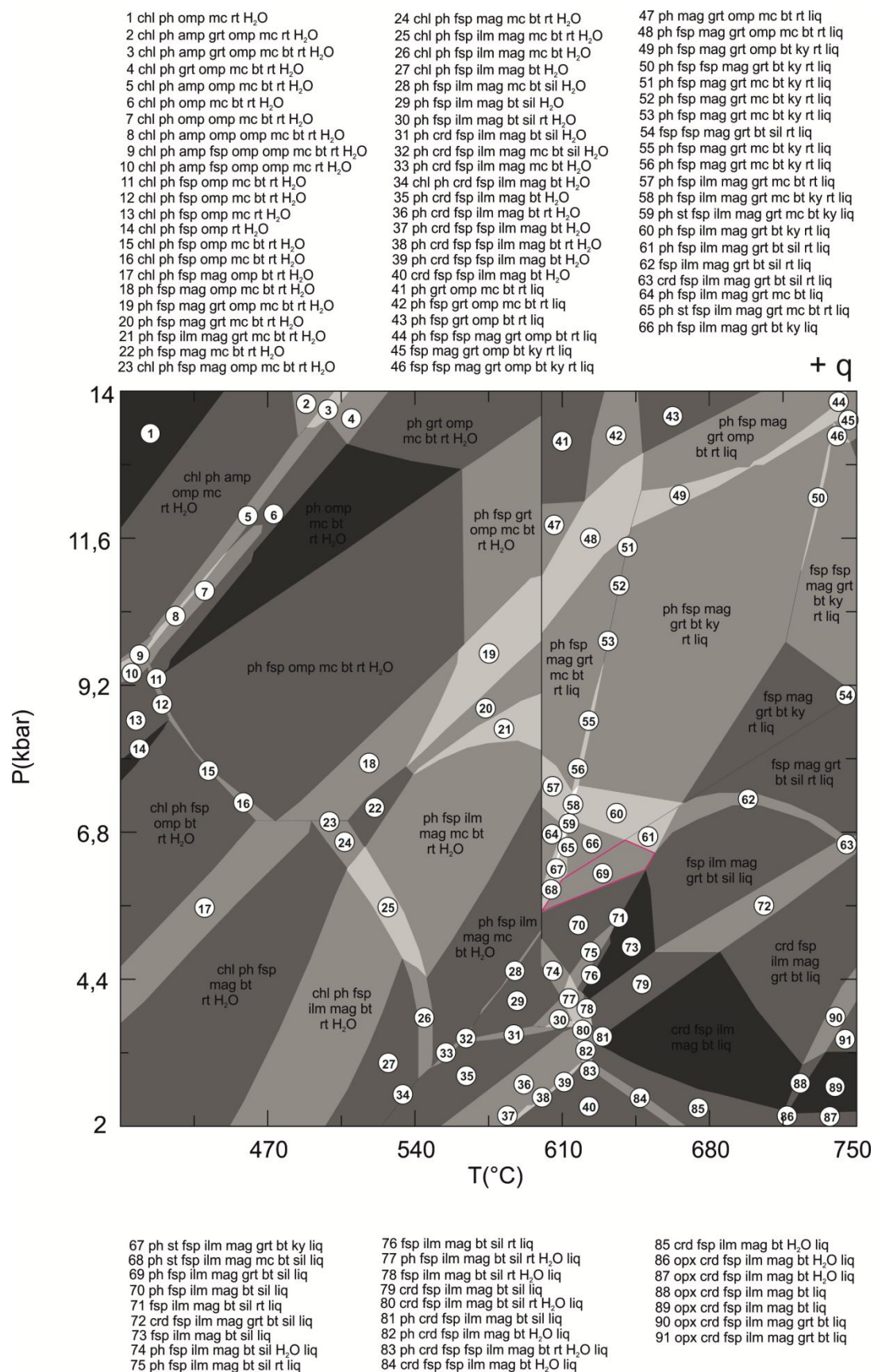
U slučaju migmatita volumni udjeli pokazivali su na tri manja moguća polja, s tim da je najveće preklapanje bilo na polju broj 69 (slika 34). Preostala dva polja eliminirana su na temelju činjenice da se niti u jednom analiziranom uzorku ne pojavljuju mineralne zajednice vezane za ta polja (u ovom slučaju staurolit i kianit). Temperaturni raspon u kojem su nastali migmatiti je od 600 do 655°C, a raspon tlakova je od 5,5 do 6,6 kbara.



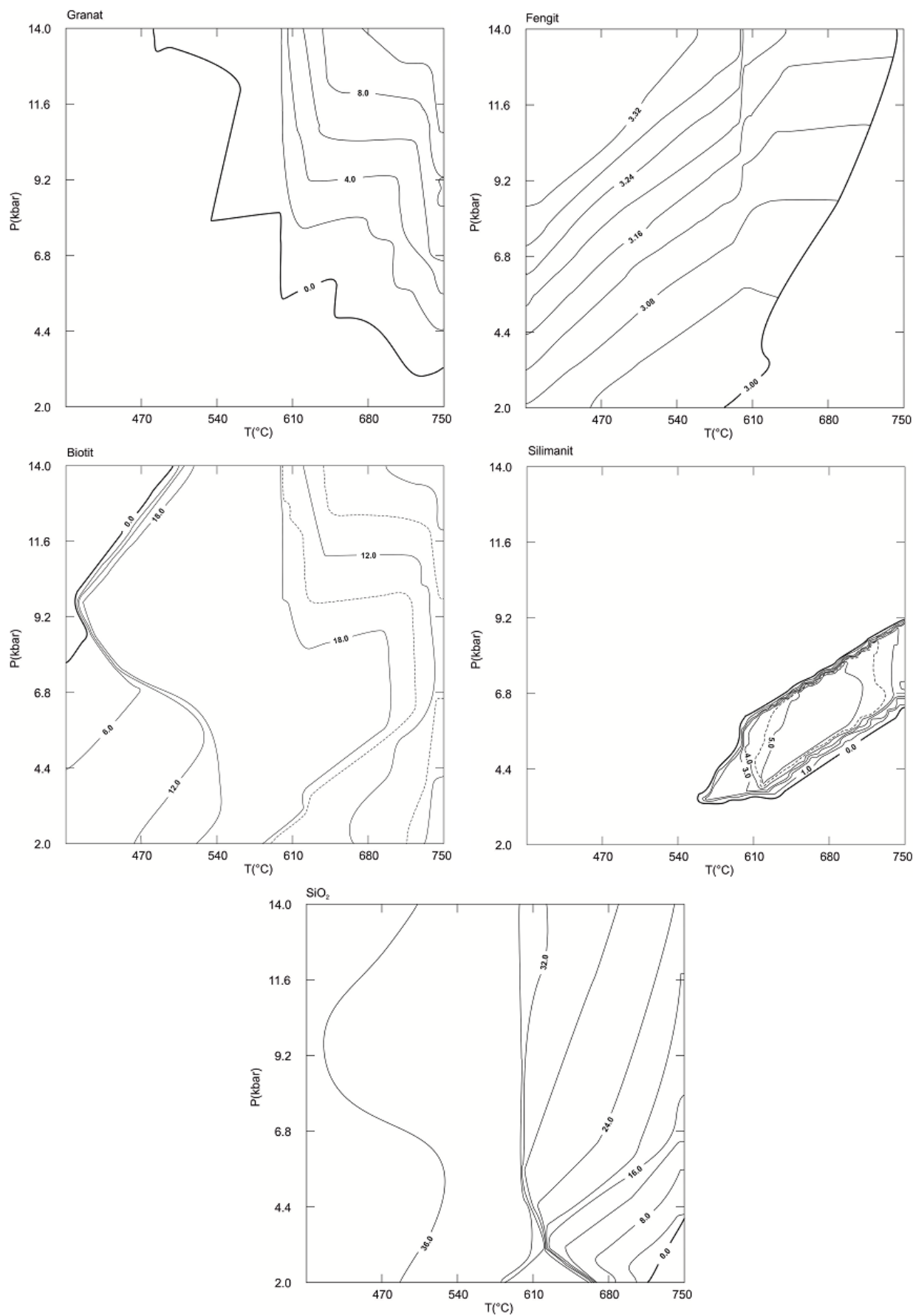
Slika 32. Pseudopresjek za uzorak PUK5 s označenim nazivima mineralnih paragenaza i poljem stabilnosti za biotitni škriljavac.



Slika 33. Volumni udjeli faza u uzorku PUK5. Debljom linijom označen je najmanji zadani udio minerala.



Slika 34. Pseudopresjek uzorka SH-3 s označenim nazivima mineralnih parageneza i poljem stabilnosti za migmatit. Deblja linija koja prolazi središtem slike označava solidus.



Slika 35. Volumni udjeli faza u uzorku SH-3. Debljom linijom označen je najmanji zadani udio minerala.

7. Rasprava

7.1. Petrografija

Analizom mikroskopskih preparata utvrđena je velika sličnost u sastavu pojedinih istraživanih stijena. Graniti i leukosomi u gnajsevima imaju gotovo identičan sastav. Ista strukturna obilježja, podjednaki udjeli mineralnih vrsta i slična veličina zrna ukazuju na to da među stijenama postoji neka genetska povezanost. Usporedbom granita s leukosomima u migmatitima i biotitnom škriljavcu također se mogu utvrditi sličnosti u sastavu i udjelima pojedinih minerala, iako se znatno teže uočavaju zbog velikih razlika u strukturi.

U preparatima se, isto kao i na terenu, jasno uočava kontinuirani prijelaz iz leukosomom bogatih okcastih gnajseva u melanosomom bogate migmatitne gnajseve, biotitne škriljavce i migmatite. Kako se udio leukosoma u gnajsevima postupno smanjuje, listići tinjaca koji u okcastim gnajsevima najčešće povijaju oko velikih zrna kvarca i feldspata, postupno se reorganiziraju u deblje, međusobno paralelne lamine dominantno građene od tinjaca, a između njih se nalaze tinjcima osiromašeni, sve tanji leukosomi. Ova pojava ukazuje na to da je smjer deformacije tijekom parcijalnog taljenja gnajseva bio konstantan, odnosno okomit na folijaciju.

Osim reorganizacije biotita, u stijenama se događaju promjene u mineralnom sastavu. Prelaskom iz gnajseva u migmatite u stijenama se postupno smanjuje udio muskovita, a trošenje plagioklasa sve je više izraženo. U migmatitnim gnajsevima uočene su prve pojave porfiroblasta granata, koji zbog veoma malenog udjela u uzorcima predstavljaju akcesorni sastojak. Udio granata povećava se prelaskom u biotitne škriljavce i stromatitne migmatite ali i dalje ne prelazi 1 vol.%. U boranim migmatitima granati su mnogo zastupljeniji i čine oko 3 vol.% uzoraka.

Na temelju izgleda zrna i njihovog položaja unutar uzoraka, granati se mogu podijeliti na dvije generacije. Prva generacija granata formirala se u migmatitnim gnajsevima, biotitnim škriljancima i stromatitnim migmatitima. Ovi porfiroblasti se u boranim migmatitima nalaze u leukosomima i melanosomima. Zbog nižeg stupnja parcijalnog taljenja njihov udio u stijenama je malen. Granati druge generacije formiraju se u boranim migmatitima. Boranjem primarne folijacije nasljeđene iz gnajseva povećava se stupanj parcijalnog taljenja te se u stijenama stvara veći broj nukleacijskih centara iz kojih nastaje veći broj porfiroblasta. Granati prve generacije koji se nalaze u leukosomima boranih

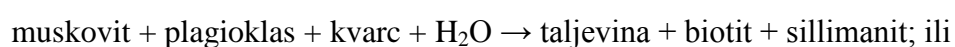
migmatita se fragmentiraju i pucaju pod utjecajem naprezanja, dok su granati koji su zaostali u melanosomima nakon što se iz njih izdvojila taljevina, zaštićeni su od utjecaja deformacije te se ne fragmentiraju.

Izgled i međusobni odnosi među stijenama u kamenolomu sugeriraju da je boranje migmatita uzrokovano probijanjem granitnih žila i dajkova kroz biotitne škriljavce tijekom utiskivanja granitnog tijela. Gustoća ovih žila i dajkova, koji također presijecaju gnajseve, najveća je u središnjim dijelovima kamenoloma gdje je stupanj migmatizacije najizraženiji. Povećanje temperature uzrokuje pojačano parcijalno taljenje leukosoma, a povećanje tlaka uzrokuje migraciju novonastale taljevine u tjemene dijelove bora gdje je pritisak bio nešto niži. Migmatiti koji se nalaze na nešto većoj udaljenosti od središnjih dijelova kamenoloma znatno su slabije deformirani, te se u njima debele žile leukosoma mjestimično pojavljuju.

PAMIĆ et LANPHERE (1991) u svom su istraživanju definirali okcaste gnajseve kao protolit čijim su parcijalnim taljenjem nastali migmatiti. U tom bi slučaju žilice s porfiroblastima granata u uzorku SH-8 mogle predstavljati početne stadije migmatizacije, a njihov bi sastav onda trebao odgovarati sastavu početne taljevine. Nastanka migmatita je prema tome započeo mjestimičnim stvaranjem malenih „džepića“ taljevine u gnajsevima. Pošto proučavani okcasti gnajsevi nisu sudjelovali u daljnjem parcijalnom taljenju, žilice su ostale zarobljene u njima kao propali leukosomi.

Najveći dio gnajseva u kamenolomu ipak je nastavio s transformacijom u migmatite. Pod utjecajem naprezanja, udio taljevine u njima postajao je sve veći što je omogućilo međusobno spajanje „džepića“ u veće nakupine ili žilice. Kada je udio taljevine u gnajsevima dosegao kritičnu vrijednost počelo je njezino izdvajanje iz stijena. Ovaj proces postupno dovodi do nastanka migmatitni gnajseva i biotitnih škriljavaca iz kojih se daljnjom deformacijom i višestrukim boranjem razvijaju migmatiti.

SOLAR et BROWN (2001) navode kako je u uvjetima gornjeg amfibolitnog facijesa zbog ograničene količine volatilne faze bogate vodom parcijalno taljenje omogućeno dehidracijom muskovita prema sljedećim reakcijama:



Postupno smanjenje u udjelima muskovita, povećanje u stupnju trošenja plagioklasa te pojave sillimanita (fibrolita) u uzorcima sugeriraju da se parcijalno taljenje možda odvijalo prema jednoj (ili obje) od navedenih reakcija. Za točne omjere među pojedinim mineralima u reakcijama potrebne su dodatne kemijske analize koje u ovom radu nisu provedene.

Dajkovi efuziva koji presijecaju stijene u kamenolomu intrudirali su nakon formacije granitno – migmatitnog kompleksa. LUGOVIĆ (1983) ove efuzive svrstava u dio toleitne serije karakteristične za moicen Panonskog bazena. Dva analizirana uzorka efuziva iz kamenoloma Šandrovac definira kao bazalte, što nije u skladu s interpretacijom u ovom radu u kojem su također analizirana dva efuziva. LUGOVIĆ (1983) definira strukturu bazalta kao porfirnu do oligotrofnu koju karakterizira manji udio fenokristala. Bazalti se sastoje od bazičnih plagioklasa, monoklinskih piroksena, opákih minerala te akcesornog apatita. Plagioklasi su alterirani u agregat sericita i kalcita dok su pirokseni u različitoj mjeri kloritizirani.

U ovom radu jedan od efuziva određen je kao bazalt do andezit. Razlog zašto je stijena klasificirana kao prijelazni oblik između bazalta i andezita je udio klinopiroksena koji u stijeni ne prelazi 30 vol.%. U uzorcima su unutar klorita uočeni maleni fragmenti nekog minerala s intenzivnim pleokroizmom u zelenoj i smeđoj boji što odgovara hornblendi. Nažalost, fragmenti su bili premaleni da bi se mogli točno odrediti. Ova pojava u kloritima može se interpretirati na dva načina. Moguće je da je u stijenama bila prisutna određena količina hornblende koja je u potpunosti alterirala u klorit ili su ovi fragmenti nastali kao posljedica trošenja klinopiroksena.

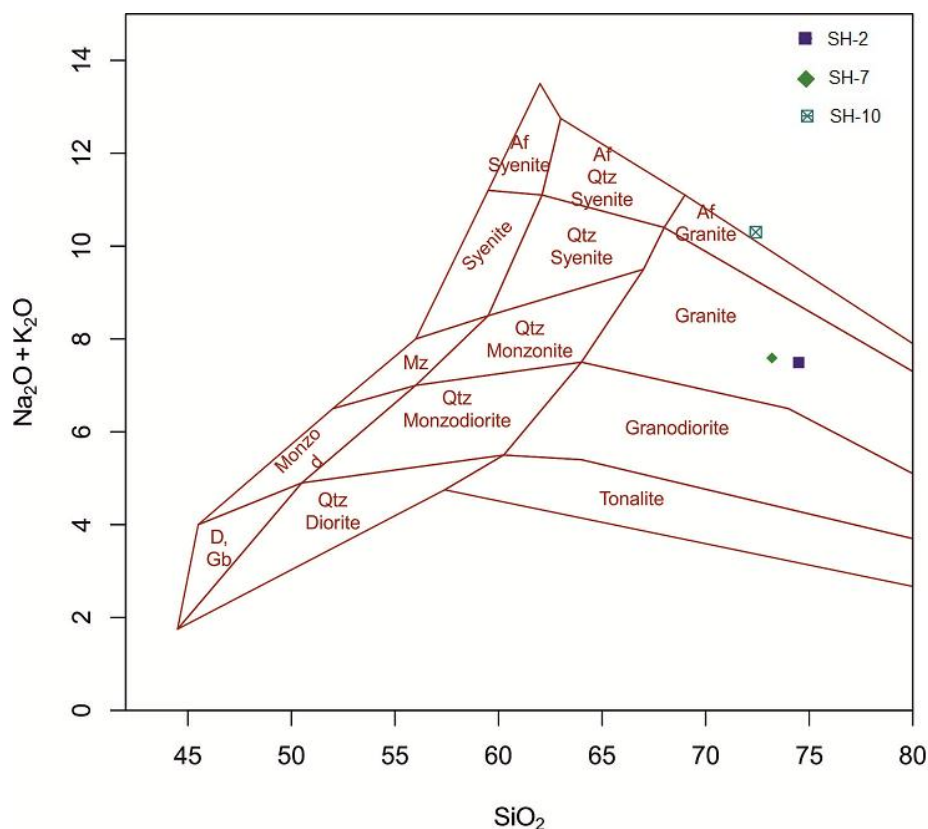
Drugi uzorak koji je klasificiran kao andezit se ne spominje u njegovom radu, iako analizira andezite iz potoka Ciganovca. U andezitu su unutar klorita također uočeni maleni fragmenti s intenzivnim pleokroizmom.

Proučavani uzorak amfibolita nije bilo moguće uvrstiti u model nastanka stijena u kamenolomu. Po mineralnom i kemijskom sastavu uopće ne odgovara stijenama granitno – migmatitnog kompleksa. Izdanak se nalazi neposredno uz andezitni dajk tako da je njegov nastanak najvjerojatnije vezan uz ovu intruziju.

7.2. Cjelostijenska geokemijska analiza

Raspodjela glavnih elemenata u stijeni u potpunosti odražava njihov sastav. Graniti imaju veliki udio kvarca i feldspata te maleni udio tinjaca zbog čega imaju više K_2O i Na_2O . Veliki udio K_2O je najizraženiji u uzorku SH-10. Biotiti i migmatiti, s druge strane, imaju znatno veći udio tinjaca (biotita) u odnosu na granite zbog čega imaju više Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO i TiO_2 .

Za oba uzorka granita (SH-2 i SH-10) te za uzorak okcastog gnajsa (SH-7) konstruiran je TAS klasifikacijski dijagram prema MIDDLEMOST (1994). Na dijagramu (slika 36) se vidi da sva tri stijenska uzorka pripadaju granitima, s tim da uzorak SH-10 pada u polje alkalijsko feldspatskih granita.



Slika 36. TAS klasifikacijski dijagram prema MIDDLEMOST (1994).

Uzorci normalizirani na hondrit (slika 30) imaju ujednačenu raspodjelu REE. Svi uzorci pokazuju obogaćenje na LREE i negativnu Eu anomaliju. U slučaju granita (ali i migmatita i gnajseva), obogaćenje na LREE ukazuje na njihovo sedimentno podrijetlo (SOLAR et BROWN, 2001).

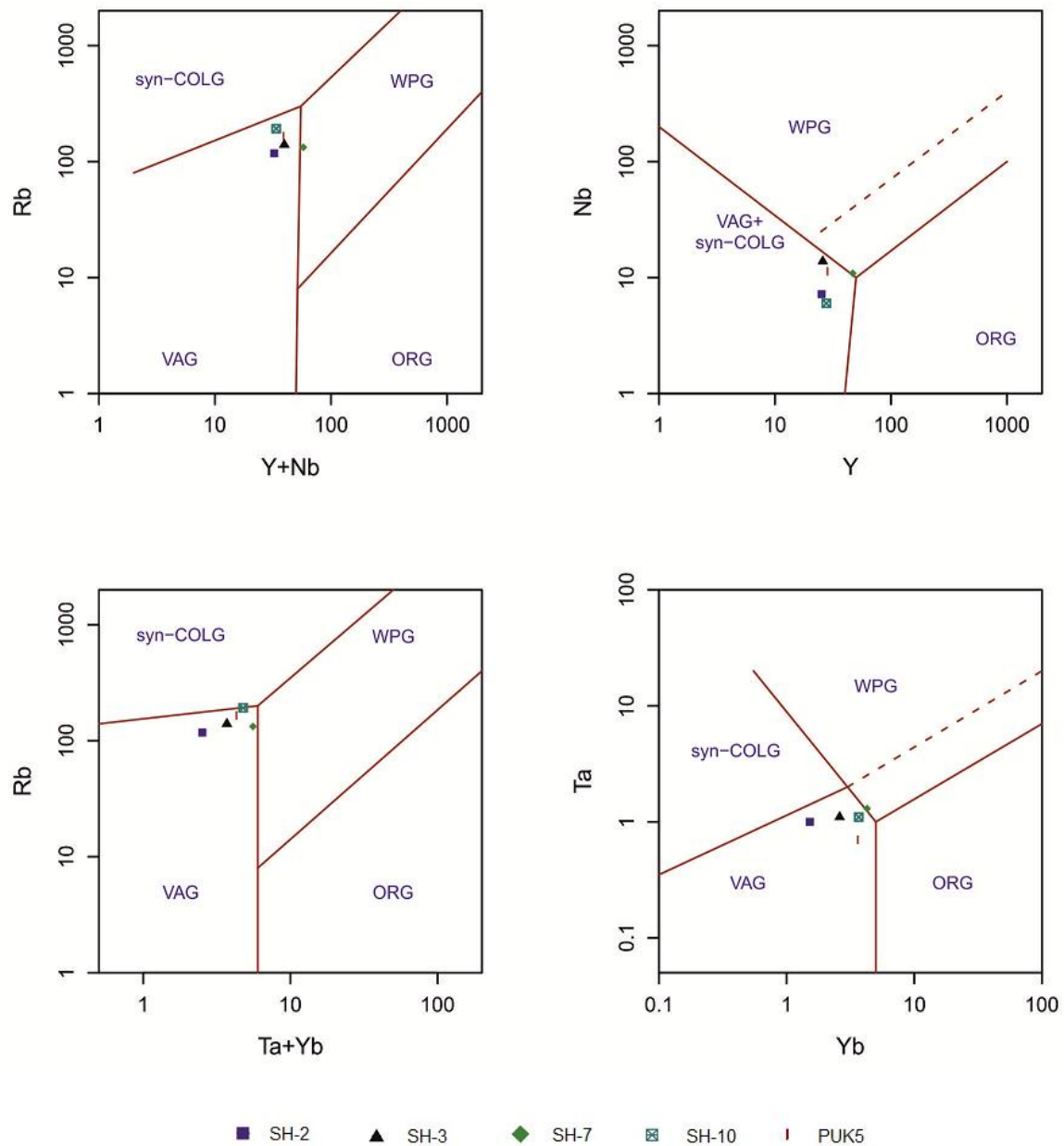
Uzorci normalizirani na gornju kontinentsku koru (slika 31) pokazuju značajne varijacije u distribuciji pojedinih elemenata. Ovakva neujednačena raspodjela najvjerojatnije je posljedica kompleksnih procesa kroz koje su stijene prošle. Parcijalno taljenje i nastanak migmatita je diskontinuirani proces u kojem se taljevina nakuplja u stijenama dok ne dosegne kritičnu vrijednost, nakon čega se izdvaja iz stijene i proces počinje ponovno (BROWN, 2008). Mehanizam koji kontrolira nastanak taljevine i moguće puteve kojima će se ona izdvojiti iz stijena je deformacija (SOLAR et BROWN, 2001; SAWYER, 2008). To znači da različiti dijelovi migmatita mogu prolaziti kroz različiti stupanj parcijalnog taljenja i deformacije, što će uzrokovati razlike u količini novonastale taljevine u različitim dijelovima stijene. Prilikom migracije, mješanja i preraspodjele taljevine doći će do preraspodjele u distribuciji mobilnih elemenata u pojedinim dijelovima stijene te do obogaćenja ili osiromašenja taljevine na određene elemente.

BEA (1996) navodi da koncentracije Th, U, Y i REE u granitoidima padaju s porastom stupnja diferencijacije. Okcasti gnajsevi u odnosu na migmatit i granite imaju najveće koncentracije REE zato što nisu prošli kroz značajno parcijalno taljenje. Kretanjem prema biotitnim škrljajcima i migmatitima udio REE u uzorcima postupno se smanjuje kako se povećava stupanj parcijalnog taljenja. U oba uzorka granita koncentracije REE su manje u odnosu na ostale stijene, s tim da je osiromašenje na REE posebice izraženo u uzorku SH-10.

Koncentracije REE, Th, U i Y najveće su u akcesornim mineralima (BEA, 1996). Minerali koji ranije kristaliziraju iz taljevina, kao što je biotit, u sebe obično uklapaju akcesorne faze, a samim time i REE. Zbog toga su rezidualne taljevine osiromašene na ove elemente (BEA, 1996). Razlike u mineralnom sastavu između uzorka SH-10 i ostalih analiziranih granita te značajno osiromašenje na REE, Zr i U koji se obično koncentriraju u akcesornim cirkonima, sugeriraju da ovaj uzorak možda predstavlja rezidualnu taljevinu. Moguće je da uzorak SH-10 odražava sastav leukosoma koji su migrirali iz gnajseva. Prolazak granita kroz uske sustave pukotina i žila tijekom migracije taljevine uzrokovao bi preferiranu orijentaciju tinjaca koja je uočena u ovom uzorku.

Tektonski okoliš postanka granitoida u kamenolomu određen je pomoću dijagrama za tektonsku diskriminaciju granita prema PEARCE et al. (1984). Točke na dijagramima (slika 37) predstavljaju granite (SH-2 i SH-10), gnajs (SH-7), biotitni škrljajac (PUK5) i

migmatit (SH-3). Sve točke na dijagramima padaju u polja koja odgovaraju granitima vulkanskih lukova (VAG). Ovaj rezultat dodatno potvrđuju visoki iznosi omjera Th/Ta te povećane koncentracije K, Rb, Ba, Th, Ce i Sm u većini uzoraka (PEARCE et al., 1984).



Slika 37. Tektonska diskriminacija za granite prema PEARCE et al. (1984). Kratice na dijagramima: VAG – graniti vulkanskih lukova (Volcanic Arcs Granites); syn-COLG – sinkolizijski graniti (Syncollision Granites); WPG – graniti unutar ploča (Within Plates Granites); ORG- graniti srednjooceanskog grebena (Ocean Ridge Granites).

7.3. Perple_X

PT-uvjeti tijekom nastanka biotitnog škriljavca (PUK5) i migmatita (SH-3) određeni su preklapanjem pseudopresjeka s volumnim udjelima minerala uočenih u preparatima. Za uzorak biotitnog škriljavca (slika 32) dobiven je temperaturni raspon od 550°C do 700°C i raspon tlakova od 3,5 kbara do 7,6 kbara. Raspon temperatura za migmatit (slika 34) iznosi od 600°C do 655°C, a raspon tlakova je od 5,5 do 6,6 kbara.

Ovi rezultati su realni s obzirom na metodu kojom su dobiveni. Konstruiranjem izopleta dobile bi se točnije vrijednosti. Nažalost, raspon tlakova i temperatura za biotitni škriljavac je prevelik da bi se na temelju njega mogli donositi neki zaključci.

Raspon tlakova i temperatura za migmatit sugerira da je stijena nastala u PT-uvjetima gornjeg amfibolitnog facijesa. Dobiveni rezultati ugrubo se podudaraju s vrijednostima koje u svom radu navode PAMIĆ et LANPHERE (1991). Oni tvrde da parcijalno taljenje odvija pri tlaku od 5 do 6 kbara i temperaturi od otprilike 600°C. Migmatitna mobilizacija se prema njima odvija u temperaturnom rasponu od 670 do 680°C.

7.4. Usporedba s ranijim autorima

Postanak migmatita i procese vezane uz njih u svojim radovima proučavaju TAJDER (1969), VRAGOVIĆ (1969) i PAMIĆ et LANPHERE (1991). Model nastanka granitno – migmatitnog kompleksa u ovom radu ne slaže se s modelima koje su dali TAJDER (1969) i VRAGOVIĆ (1969). U oba rada opisuju postanak magmatskih i metamorfnih stijena slavonskih planina u okviru hercinskog orogenetskog ciklusa, te daju model razvoja progresivnometamorfnog i granitno – migmatitnog kompleksa Papuka i okolne podloge Panonskog bazena. U svojim modelima zaključuju da je tijekom intruzije granitnog tijela došlo do rekristalizacije migmatita iz kojih su se na kraju formirali okcasti gnajsevi. Ovi zaključci, koji se danas smatraju zastarjelima, u skladu su s tadašnjim znanjem o migmatitima i procesima vezanim uz njihov nastanak.

U današnje vrijeme je općeoznata činjenica da migmatiti predstavljaju „hibridne“ stijene koje istovremeno prolaze kroz metamorfozu i parcijalno taljenje, stoga je model nastanka stijena opisan u ovom radu u skladu s današnjim koncepcijama i znanjem o migmatitima.

PAMIĆ et LANPHERE (1991) u svom radu detaljno opisuju mineralni i kemijski sastav brojnih strukturnih varijeteta granita i migmatita slavonskih planina. Gnajseve, migmatite i pridužene granite smatraju dijelom jedinstvenog genetski povezanog kompleksa koji je nastao tijekom hercinskog orogenetskog ciklusa. Njihova interpretacija nastanka ovog stijenskog kompleksa komplementarna je s modelom nastanka stijena u kamenolomu.

Klasifikacija efuziva u kamenolomu, koje je LUGOVIĆ (1983) opisao kao bazalte porfirne strukture nije u skladu s opisom u ovom radu. Razlog neslaganja ove dvije interpretacije nije poznat pošto nije bilo moguće međusobno usporediti analizirane uzorke.

8. Zaključak

Različiti varijeteti migmatitnih stijena u kameolomu Šandrovac nastali su parcijalnim taljenjem okcastih gnajseva. Pod utjecajem povišene temperature i tlaka formiraju se sustavi žila i kanala kojima se taljevina izdvaja iz stijena, stvarajući pritom leukosomom osiromašene migmatitne gnajseve i biotitne škriljavce. Stvaranje karakterističnih boranih migmatita u središnjem dijelu kamenoloma uzrokovano je probijanjem granitnih žila i dajkova kroz biotitne škriljavce tijekom utiskivanja granitnog tijela.

Stijene u kamenolomu, zajedno sa stijenama granitno – migmatitnog kompleksa Papuka i kristaline podloge Panonskog bazena, nastale su u sklopu glavne deformacijske faze hercinskog orogenetskog ciklusa, u tektonskom okolišu koji odgovara recentnim vulkanskim lukovima. Formacija migmatita odvijala se u uvjetima gornjeg amfibolitnog facijesa, pri temperaturi od 600 do 660°C i tlaku od 5,5 do 6,6 kbara. Protolit gnajseva i granita bile su sedimentne stijene.

U micoenu, kada se na prostoru Panonskog bazena odvijala inzentivna vulkanska aktivnost, hercinske stijene u kamenolomu ispresijecane su brojim dajkovima efuziva bazaltnog do andezitnog sastava.

9. Korištena literatura

Balen, D., Horváth, P., Finger, F. & Starijaš, B. (2013): Phase equilibrium, geothermobarometric and xenotime age dating constraints on the Alpine metamorphism recorded in chloritoid schists from the southern part of the Tisia Mega-Unit (Slavonian Mts., NE Croatia). *Int. J. Earth Sci.*, 102, 1091 – 1109.

Balen, D., Radonić, G. & Pavić, G. (2010): Geološka baština Geoparka Papuk. 4. Hrvatski geološki kongres, Šibenik 2010., 24 str.

Balen, D. & Tomljenović, B. (2005): Croatian – Austrian Student Excursion in Mineralogy and Petrology, Slavonian Mts. Area, 5. – 8.5.2005., 22 str., Zagreb.

Bea, F. (1996): Residence of REE, Y, Th and U in Granites and Crustal Protoliths; Implications for the Chemistry of Crustal Melts. *Journal of Petrology*, Vol. 37, 3, 521 – 552.

Biševac, V., Krenn, E., Finger, F., Lužar-Oberiter, B. & Balen, D. (2013): Provenance of Paleozoic very low- to low-grade metasedimentary rocks of South Tisia (Slavonian Mountains, Radlovac Complex, Croatia). *Geologia Carpathica*, 64, 3 – 22.

Boyton, W. V. (1984): Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. U: Rare earth element geochemistry (ed. Henderson, P.). Elsevier, 63 – 114, Amsterdam.

Brown, M. (2002): Retrograde processes in migmatites and granulites revisited. *J. Metamorphic Geol.*, 20, 25 – 40.

Brown, M. (2008): Chapter 6: Granites, migmatites and residual granulites: relationships and processes. U: Working with Migmatites (eds. Sawyer, E. W. & Brown, M.). Mineralogical Association of Canada, Short Course Series Volume 38, 97 – 144, Quebec.

Connolly, J. A. D. (2005): Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth and Planetary Letters*, 236, 524 – 541.

Connolly, J. A. D. & Petrini, K. (2002): An automated strategy for calculation of phase diagram sections and retrieval of rock properties as a function of physical conditions. *J. metamorphic Geol.*, 20, 697 – 708.

- Holness, M. B. (2008): Chapter 4: Decoding migmatite microstructures. U: Working with Migmatites (eds. Sawyer, E. W. & Brown, M.). Mineralogical Association of Canada, Short Course Series Volume 38, 57 – 74, Quebec.
- Holness, M. B. & Sawyer, E. W. (2008): On the Pseudomorphing of Melt – filled Pores During the Crystallization of Migmatites. *Journal of Petrology*, Vol. 49 (7), 1343 – 1363.
- Jamičić, D. & Brkić (1986): Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100 000, list Orahovica, L 33 – 96. Geološki zavod, Zagreb (1986), Savezni geološki zavod, Beograd.
- Jamičić, D., Brkić, M., Crnko, J. & Vragović, M. (1987): Osnovna geološka karta SFRJ, Tumač za list Orahovica (L 33 – 96). Geološki zavod, Zagreb (1986), 72 str., Savezni geološki zavod, Beograd.
- Jamičić, D. (1988): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, list Daruvar, L 33 – 95. Geološki zavod Zagreb (1988), Savezni geološki zavod, Beograd.
- Jamičić, D., Vragović, M. & Matičec, D. (1989): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, Tumač za list Daruvar (L 33 – 95). Geološki zavod, Zagreb (1988), 55 str., Savezni geološki institut, Beograd.
- Janoušek, V., Farrow, C. M. & Erban, V. (2006): TECHNICAL NOTE Interpretation of Whole-rock Geochemical Data in Igneous Geochemistry: Introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, Vol. 47, 6, 1255 – 1259.
- Lugović, B. (1983): Efuzivne stijene sjeverozapadnog dijela Papuka. *Geološki vjesnik*, 36, 131 – 156, Zagreb.
- Marci, V. (1968): Utvrđivanje porijekla anklava i gnajsa Papuka na osnovu sadržaja mikroelemenata. *Geološki vjesnik*, 21, 273 – 279, Zagreb.
- Milord, I., Sawyer, E. W. & Brown, M. (2001): Formation of Diatexite Migmatite and Granite Magma during Anatexis of Semipelitic Metasedimentary Rocks: an Example from St. Malo, France. *Journal of Petrology*, Vol. 42, 3, 487 – 505.
- Nyakairu, W. A. & Koeberl, C. (2001): Mineralogical and chemical composition and distribution of rare earth elements in clay-rich sediments from central Uganda. *Geochemical Journal*, Vol. 35, 13 – 28.

Pamić, J. (1999): Kristalina podloga južnih dijelova Panonskog bazena – temeljena na površinskim i bušotinskim podacima. *Nafta*, 50 (9), 291 – 310, Zagreb.

Pamić, J. & Lanphere, M. (1991): Hercinske granitne i metamorfne stijene Papuka, Psunja, Krndije i okolne podloge Panonskog bazena u Slavoniji (sjeverna Hrvatska, Jugoslavija). *Geologija*, 34, 81 – 253, Ljubljana.

Pamić, J., Radonić, G. & Pavić, G. (2003): Geološki vodič kroz park prirode Papuk. 30 str., Velika.

Pavelić, D. (2001): Tectonostratigraphic model for the North Croatian and North Bosnian sector of the Miocene Pannonian Basin System. *Basin Research*, 12, 359 – 376.

Pearce, J. A., Harris, N. B. W. & Tindle, A. G. (1984): Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, Vol. 25, 4, 956 – 983.

Rafaeli, P. (1965): Metamorfizam paleozojskih škriljavaca u području Ravne gore (Papučko gorje – Slavonija). *Geološki vjesnik*, 18/1, 61 – 111, Zagreb.

Sawyer, E. W. (2008): Chapter 2: Identifying the parts of migmatites in the field. U: *Working with Migmatites* (eds. Sawyer, E. W. & Brown, M.). Mineralogical Association of Canada, Short Course Series Volume 38, 29 – 36, Quebec.

Schmid, S. M., Bernoulli, D., Fügenschuh, B., Manteco, L., Schefer, R., Schuster, R., Tischler, M. & Ustaszewski, K. (2008): The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss J. Geosci.*, 101, 139 – 183.

Seghedi, I., Downes, H., Szakács, A., Mason, P.R.D., Thirlwall, M., Roşu, E., Pécskay, Z., Márton, E. & Panaiotu, C. (2004): Neogene – Quaternary magmatism and geodynamics in the Carpathian – Panonian region: a synthesis. *Lithos*, 72, 117 – 146.

Slovenac, D. (1978): Mogućnost korištenja biotita kao indikatora geneze granito – metamorfnih stijena Papuka. *Geološki vjesnik*, 30, 351 – 357, Zagreb.

Slovenac, D. (1982): Kemijski sastav biotita, granata i amfibola kao pokazatelj temperature formiranja granito – metamorfnih stijena Papuka. *Geološki vjesnik*, 35, 133 – 152, Zagreb.

Solar, G. & Brown, M. (2001): Petrogenesis of Migmatites in Maine, USA: Possible Source of Peraluminous Leucogranite in Plutons? *Journal of Petrology*, Vol. 42, 4, 789 – 823.

Tajder, M. (1955): Petrografsko istraživanje zapadnog dijela Papuka. *Ljetopis JAZU*, 62, 316 – 323, Zagreb.

Tajder, M. (1969): Magmatizam i metamorfizam planinskog područja Papuk – Psunj. *Geološki vjesnik*, 22, 469 – 476, Zagreb.

Taylor, S. R. & McLennan S. M. (1995): The geochemical evolution of continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33, 241 – 265.

Vragović, M. (1965): Graniti i gnajsi Papuka. *Disertacija, PMF*, 232+7, Zagreb.

Vragović, M. (1965): Prilog poznavanju petrografskog sastava granitoidnih terena Papuka. *Acta Geologica*, 4, 327 – 332, Zagreb.

Wolf, R. E. (2005): What is ICP-MS? ...and more importantly, what can it do? (http://crustal.usgs.gov/laboratories/icpms/What_is_ICPMS.pdf) (1.9.2015).